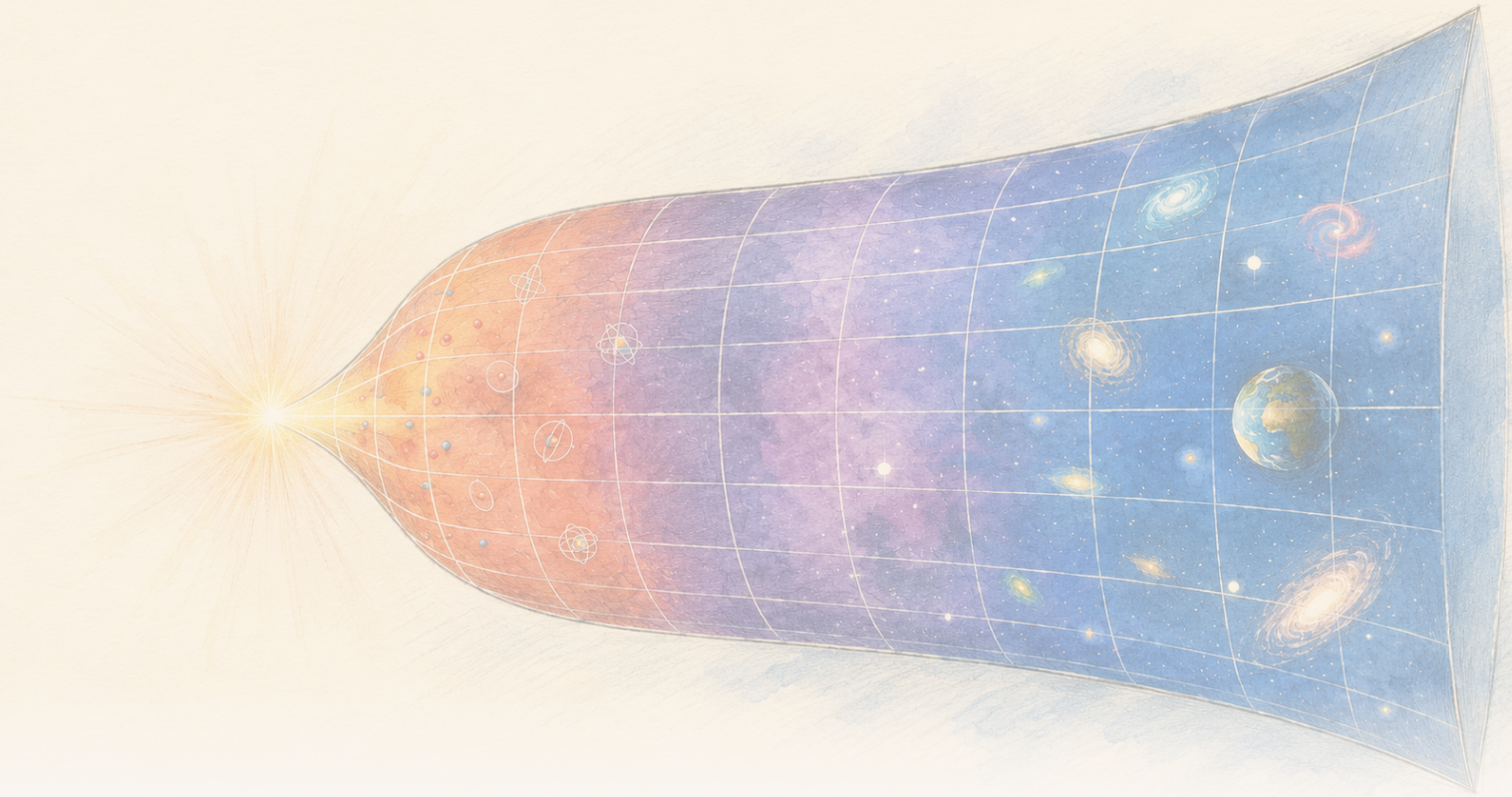

The Clean Paper

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

I en entropibaserad gravitationsmodell minskar den lokala entropitätheten medan totalsumman växer

En artikel i Physical Review D härleder temperaturer, tryck och en första lag inom Gravity From Entropy, ett föreslaget ramverk för modifierad gravitation. I en Friedmannapproximation för sena tider och liten krökning minskar modellens lokala entropi- och energitäthet, medan expansionen får den totala entropin att stiga. Beräkningen är internt konkret men villkorad: Friedmannkosmologier är inte exakta lösningar till den fullständiga teorin, och detta är inte observationsbelägg för att gravitation kommer från entropi, en förklaring av uppmätt mörk energi eller en fullbordad kvantgravitationsteori.

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

En växande volym kan sänka en densitet samtidigt som totalsumman ökar

Om entropitätheten i modellen sjunker när universum expanderar, hur kan den totala entropin ändå öka?

Föreställ dig ett expanderande universum indelat i små celler. Mängden av något i varje cell kan minska samtidigt som den sammanlagda mängden i det växande området ökar. En minskad densitet och en ökad totalsumma är inte motsatser när själva volymen förändras.

Det elementära bokföringsproblemet står i centrum för en betydligt mer ambitiös teoretisk artikel. I Physical Review D utvecklar den matematiska fysikern Ginestra Bianconi en termodynamisk beskrivning av **Gravity From Entropy** (GfE), en nyligen föreslagen modell där gravitation kodas genom ett informationsteoretiskt samband mellan materia och geometri. Här betyder ”informationsteoretiskt” att modellen utgår från ett matematiskt mått på hur två beskrivningar av geometri skiljer sig: den fysiska geometrin och en geometri som induceras av materia och krökning.

Artikeln härleder lokala storheter som kallas k-entropier, k-energier, k-temperaturer och k-tryck. Prefixet k skiljer olika geometriska sektorer i modellen åt; de är inte olika ämnen eller kosmiska epoker. Deras första lag har samma bokföringsform som i termodynamiken: en energiförändring relateras till temperatur gånger en entropiförändring, minus tryck gånger en volymförändring.

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

Artikeln beräknar sedan storheterna för expanderande Friedmannkosmologier: standardiserade idealuniversum som är homogena och isotropa på stora skalor. I en regim med låg energi och liten krökning får de materia- och strålningsdominerade exemplen minskande lokal entropi- och energitäthet, men expansionen ger tillräckligt mycket volym för att den totala entropin ska öka. Den totala energin närmar sig en konstant i ledande ordning, alltså när den dominerande termen vid sena tider behålls och termer som avtar snabbare med tiden tas bort.

Det är ett tydligt matematiskt resultat. Dess gräns är lika viktig: beräkningen görs **inom en föreslagen teori**, och de Friedmannkosmologier som används i de konkreta exemplen är bara **approximativa**, inte exakta, lösningar till de fullständiga GfE-ekvationerna. Dessa rörelseekvationer kommer från variation av den föreslagna GfE-verkan och innehåller det dynamiska G-fältet och geometriska sektorer av högre ordning som saknas i vanliga Friedmannekvationer. Artikeln observerar inte att entropi skapar gravitation, identifierar inte den mörka energin i vårt universum och fullbordar inte en teori för kvantgravitation.

Vad Gravity From Entropy antar

Den allmänna relativitetsteorin beskriver gravitation genom rumtidens geometri. Materia talar om för rumtiden hur den ska krökas, och krökningen talar om för materien hur den ska röra sig. GfE

utgår från en annan föreslagen verkan: den behandlar metrikrelaterade objekt som kvantoperatorer och bygger sin Lagrangedensitet av en **geometrisk kvantrelativ entropi** (GQRE).

> **Tre termer på 120 sekunder**
>
> En **kvantoperator** är en matematisk regel som verkar på ett kvanttillstånd och representerar en storhet eller omvandling. GfE antar att dess metrikrelaterade objekt kan behandlas på detta sätt; artikeln kräver inte att läsaren återskapar konstruktionen.
> En **Lagrangedensitet** är ett kompakt matematiskt recept för en teoris dynamik. Integrera den över rumtiden för att få en verkan och variera sedan verkan för att härleda fältekvationerna.
> **GQRE** är den modellspecifika Lagrangedensitet som GfE väljer. Den anpassar idén om kvantrelativ entropi för att jämföra den fysiska metriken med en metrik av högre ordning som induceras av materia och krökning. Att den kallas entropi gör den inte till vanlig värmeentropi.

Relativ entropi är vanligen ett mått på hur urskiljbara två sannolikhetsfördelningar eller kvanttillstånd är. I GfE jämförs den fysiska metriken med en metrik av högre ordning som induceras av materia och krökning. ”Högre ordning” betyder inte extra rumtidsdimensioner. Det betyder att modellen samlar skalära, vektorliknande och bivektorliknande geometriska sektorer i ett utvidgat objekt. Ett dynamiskt **G-fält** kopplar samman komponenterna och ”kläder” metriken som används i både gravitations- och materiedelarna av modellen. Ramverket konstrueras så att dess verkan, i gränsen för låg energi och liten krökning, reduceras till den allmänna relativitetsteorins Einstein–Hilbert-verkan plus materieverkan.

Den sista meningen är lätt att läsa för långt. Att återfå Einsteins ekvationer i en gräns är ett konsistensmål för förslaget. Det visar inte att naturen använder den större teorin utanför gränsen.

GfE:s fältekvationer innehåller också en dynamisk term som ramverket kallar en **emergent effektiv mörkenergiterm**. I denna artikel identifierar Bianconi modellens interna energitäthet med den termen. ”Effektiv mörk energi” beskriver dess roll i ekvationerna. Det är ingen empirisk identifiering med den mörka energi som härleds ur kosmologiska observationer.

> **Tre olika användningar av ordet ”entropi”**
>
> **Vanlig termodynamisk entropi** räknar hur många mikroskopiska arrangemang som kan ge ett makroskopiskt tillstånd. **Kvantrelativ entropi** mäter hur urskiljbara två kvanttillstånd är. **GQRE** i denna artikel är en modellspecifik geometrisk konstruktion inspirerad av relativ entropi och använd som gravitationens Lagrangedensitet. Liknande namn gör inte storheterna utbytbara; artikeln härleder de samband den använder inom GfE.

Det exakta termodynamiska resultatet inom modellen

Artikeln arbetar först på själva GfE-ramverkets nivå. För varje ordning och typ av geometrisk frihetsgrad, indexerad med k, definierar den:

- en lokal k-entropi från GQRE;
- en lokal k-energi från modellens interna energitäthet;
- en konjugerad k-temperatur;
- och ett k-tryck.

Storheterna följer en lokal första lag. Med artikelns notation:

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

Indexet k är inte en lista över olika ämnen eller epoker i universum. I den homogena och isotropa beräkningen märker det fem poster: en skalär post; separata tidslika och rumslika poster från den vektorliknande sektorn; samt separata tid–rum- och rum–rum-poster från den bivektorliknande sektorn. En skalär saknar riktningsindex, de vektorliknande posterna skiljer tidsriktningen från rumsriktningarna och en bivektor byggs av par av riktningar. Varje sektor kan ha sin egen temperatur och sitt eget tryck. K-temperaturen kan också vara positiv eller negativ beroende på motsvarande komponent i G-fältet.

Detta är inte temperaturer som mäts genom att placera en termometer nära en kosmologisk horisont. Standardtemperaturen för kvantfält i de Sitterrum skalar med H: **Gibbons–Hawking-temperaturen** tilldelas den kosmologiska horisonten, medan **Bunch–Davies-vakuumet** är det vanliga de Sitter-invarianta kvanttillstånd vars fältkorrelationer ger den tillhörande termiska responsen. Artikeln skiljer uttryckligen båda från sina geometriska k-temperaturer, som skalar med H^2 i de Sitterexemplet. Här betecknar ”temperatur” en termodynamiskt konjugerad variabel härledd ur modellens definitioner av entropi och energi.

Identiteten för den första lagen är alltså en verklig härledning, men ett **internt resultat**: godta GfE-verkan och definitionerna, så följer den termodynamiska strukturen.

Varför Friedmannberäkningen är en approximation

För att göra formalismen till ett kosmologiskt exempel använder artikeln homogena och isotropa Friedmann–Robertson–Walker-rumtider (FRW). ”Homogen” betyder att modellen på stor skala har samma genomsnittliga egenskaper på varje plats; ”isotrop” betyder att den ser likadan ut i alla riktningar. En skalfaktor beskriver hur avstånd växer med tiden, materia representeras som en jämn perfekt fluid och Hubbleparametern H sammanfattar expansionshastigheten. Detta är en idealiserad bakgrund, inte en karta över enskilda galaxer.

Men det finns en strukturell obalans. Friedmannuniversum löser Einsteins ekvationer. De löser i allmänhet inte de fullständiga GfE-ekvationerna av högre ordning, som också följer de skalära, vektorliknande och bivektorliknande sektorerna samt derivator av G-fältet. Einsteins ekvationer återkommer bara i förslagets första ordning och gräns för låg energi och liten krökning.

Artikeln säger detta direkt och behandlar Friedmannlösningarna som approximationer, i ett tillvägagångssätt som jämförs med att sätta in en medelfältslösning i en fullständigare teori för att pröva

var approximationen förblir tillförlitlig. Regimen kräver låg energi och liten krökning, sammanfattat av $l_P H \ll 1$, där l_P är Plancklängden. Ett andra villkor är att produkten av den inducerade högre ordningens metrik och inversen av den motsvarande fysiska metriken förblir positivt definit.

Resultatet är därför inte ”GfE förutsäger vårt universums historia”. Det är närmare: **om ett GfE-universum kan approximeras tillräckligt väl av en välkänd Friedmannkosmologi, är detta de termodynamiska skalningar som de fullständiga GfE-storheterna ger.**

Resultatet för lokalt kontra totalt

Inom denna regim har de ledande lokala storheterna enkla skalningar:

- modellens entropitäthet skalar som H^2;
- modellens energitäthet skalar som H^4;
- för Friedmannexempel som inte är de Sitter vid sena tider blir de ungefär t^{-2} respektive t^{-4}.

Båda tätheterna minskar alltså när universum expanderar. Men täthet är inte samma sak som total mängd.

När artikeln integrerar över det expanderande rumtidsområdet förändrar den växande volymen svaret. I de välkända materia- och strålningsdominerade exemplen ökar den totala entropin med tiden även när entropin per volymenhet minskar. Den totala energin fortsätter inte att växa; i ledande ordning närmar den sig en konstant.

Det är artikelns mest användbara begreppsliga resultat. Lokal ordning eller utspädning står inte automatiskt i konflikt med en global andra lag. Ett område kan få lägre lokal entropi per volymenhet samtidigt som den integrerade entropin växer, därför att rumtidsvolymen växer snabbare.

Beräkningen visar inte att detta är den korrekta mikroskopiska förklaringen till den termodynamiska tidspilen i det verkliga universum. Den visar att det föreslagna ramverket kan rymma uppdelningen mellan lokalt och globalt utan motsägelse i sin Friedmannapproximation.

En de Sitter-jämförelse, med en annan temperatur

Artikeln behandlar också de Sitterrum, en idealiserad exponentiellt expanderande rumtid med konstant H. För en enda observatör integrerar den bara över en ändlig **kausal diamant**: överlappningen mellan den framtida ljuskonen från en tidigare händelse och den förflutna ljuskonen till en senare, vilket avgränsar det rumtidsområde som kan delta i observationer mellan dem. Över diamanten skalar den totala GfE-entropin som H^{-2}, samma H-skalning som den välkända Gibbons–Hawking-entropin. Den totala GfE-energin är av storleksordning ett i modellens enheter.

En familj av kosmologiska bakgrunder

FRW är en familj av homogena och isotropa geometrier, inte en extra plats. Materia- och strålningsdominerade universum är FRW-fall som skiljs åt av vad som fyller modellen. De Sitterrum kan också skrivas i FRW-form, men representerar ett vakuumdominerat fall med konstant H och exponentiell expansion. Den kausala diamanten är ett ändligt område som valts inuti denna rumtid för en observatör; den är inte en annan sorts universum.

Att två storheter har samma skalning är inte detsamma som att de är samma fysikaliska objekt. Den tillhörande GfE-k-temperaturen skalar som H^2, till skillnad från den vanliga de Sittertemperaturen som skalar som H. Artikeln tolkar skillnaden som belägg för att k-temperaturen tillhör rumtidens geometri snarare än kvantfält som lever på bakgrunden.

Den föreslår sedan att en sådan temperatur *möjligen* kan kopplas till gravitonisk strålning snarare än vanlig partikelemission. Det är en framtida fråga, inte ett resultat i artikeln. Teorin skulle först behöva kvantiseras för att fastställa om dess temperaturer över huvud taget motsvarar strålning.

Vad detta inte bevisar

- Det visar **inte** genom observation att gravitation framträder ur entropi.
- Det fastställer **inte** att modellens effektiva term är den mörka energi som mäts i kosmologin.
- Det ersätter **inte** den allmänna relativitetsteorin med en testad överlägsen teori. Allmän relativitet återkommer här som förslagets gräns för låg energi och liten krökning.
- Det gör **inte** Friedmannkosmologier till exakta lösningar av GfE. De är den approximation som används för att uppskatta modellens termodynamiska beteende.
- Det härleder **inte** en fullständig mikroskopisk räkning av rumtidens frihetsgrader.
- Det ger **inte** en färdig teori för kvantgravitation och detekterar inte gravitoner.
- Det visar **inte** att negativa k-temperaturer är vanliga negativa termometeravläsningar.

Hur starkt är resultatet?

Detta är en sakkunniggranskad teoretisk artikel, så ”belägg” betyder något annat här än i ett experiment. De relevanta frågorna är om definitionerna är sammanhängande, om härledningarna följer och om approximationerna anges och kontrolleras.

På den nivån ger artikeln en konkret termodynamisk ordbok för GfE och härleder en struktur för den första lagen i stället för att enbart förlita sig på analogi. Den gör också approximationsgränsen ovanligt synlig: Friedmannlösningarna lånas från allmän relativitet, sätts in i GfE-storheterna och begränsas till en regim där den inducerade metriken förblir välbeteende.

De större fysikaliska påståendena är fortfarande öppna. Ramverket är nytt, artikeln jämför inte dess

kosmologi med data och några av de mest intressanta följderna — kvantisering, kontaktgeometrisk dynamik och möjlig gravitonisk strålning — presenteras som framtida forskningsvägar. Intern konsistens är nödvändig för en ny gravitationsteori. Den är inte tillräcklig för att visa att teorin beskriver naturen.

Varför det spelar roll

Sambandet mellan gravitation och termodynamik är gammalt och djupt, från svartahålsentropi till de Sitterrummets temperatur. Många av dessa resultat är organiserade kring horisonter. GfE försöker i stället bygga ett lokalt, volymbaserat informationsmått direkt ur relationen mellan materia och geometri.

Om förslaget kommer att överleva är en öppen fråga. Men den termodynamiska övningen blottlägger ett användbart mål för varje sådan teori: den bör förklara hur lokal struktur och minskande lokal entropitäthet kan samexistera med ökande total entropi i ett expanderande universum.

Artikeln visar ett matematiskt explicit sätt som detta kan ske på. Dess värde är inte att den avslutar problemet gravitation–entropi. Den omvandlar en del av problemet till ekvationer vars antaganden, gränser och nästa test kan anges tydligt.

Kort sammanfattning

Bianconi härleder en termodynamisk beskrivning inom Gravity From Entropy, ett föreslaget ramverk för modifierad gravitation baserat på en geometrisk kvantrelativ entropi. Modellens lokala variabler för entropi, energi, temperatur och tryck följer en första lag. När de fullständiga GfE-storheterna beräknas på Friedmannapproximationer med låg energi och liten krökning minskar den lokala entropi- och energitätheten när universum expanderar, medan den totala entropin ökar eftersom rumtidsvolymen växer; i de materia- och strålningsdominerade exemplen närmar sig den totala energin en konstant i ledande ordning. En kausal diamant i de Sitterrum ger entropi som skalar som H^{-2}, men en modelltemperatur som skiljer sig från den vanliga horisonttemperaturen. Detta är villkorade matematiska resultat inom GfE, inte observationsbelägg för att gravitation kommer från entropi, en mätning av mörk energi eller en fullbordad teori för kvantgravitation.

Källor

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