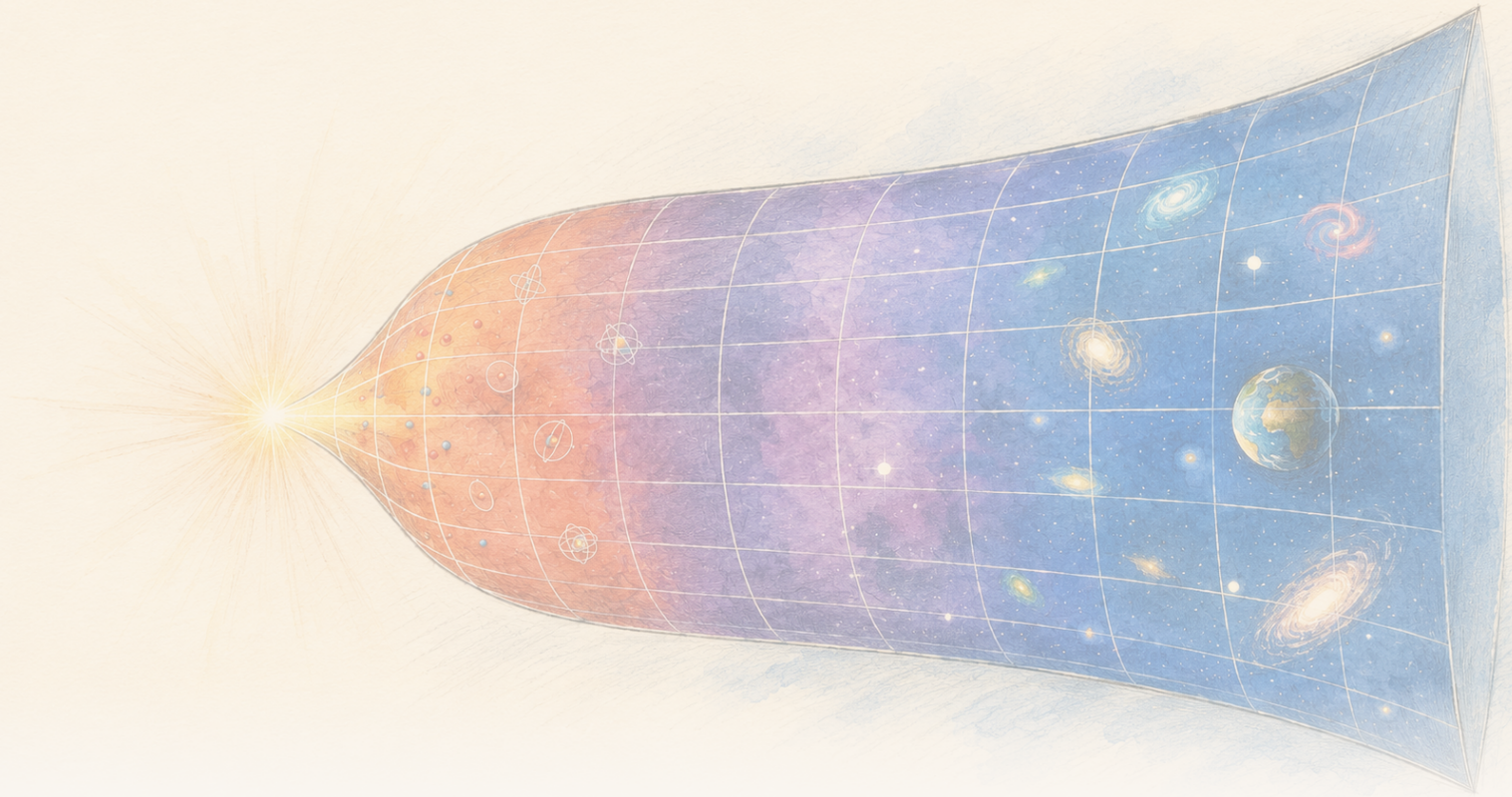

The Clean Paper

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

In un modello della gravità basato sull'entropia, la densità entropica locale diminuisce mentre il totale cresce

Un articolo su Physical Review D ricava temperature, pressioni e un primo principio all'interno di Gravity From Entropy, un modello proposto di gravità modificata. In un'approssimazione di Friedmann a tempi cosmici avanzati e bassa curvatura, le densità locali di entropia ed energia del modello diminuiscono, mentre l'espansione fa crescere l'entropia totale. Il calcolo è internamente concreto, ma condizionato: le cosmologie di Friedmann non sono soluzioni esatte della teoria completa e questo non costituisce una prova osservativa che la gravità derivi dall'entropia, una spiegazione dell'energia oscura misurata o una teoria completa della gravità quantistica.

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

Un volume che cresce può ridurre una densità e, nello stesso tempo, aumentare il totale

Se in questo modello la densità di entropia diminuisce mentre l'universo si espande, come può l'entropia totale continuare a crescere?

Immaginiamo un universo in espansione suddiviso in piccole celle. La quantità di qualcosa presente in ciascuna cella può diminuire anche mentre aumenta la quantità complessiva contenuta nella regione che si allarga. Una densità in calo e un totale in crescita non sono opposti quando cambia anche il volume.

Questa semplice questione di bilancio è al centro di un articolo teorico molto più ambizioso. In Physical Review D, la fisica matematica Ginestra Bianconi sviluppa una descrizione termodinamica di **Gravity From Entropy** (GfE), un modello proposto di recente nel quale la gravità è codificata mediante una relazione di teoria dell'informazione tra materia e geometria. Qui «di teoria dell'informazione» significa che il modello parte da una misura matematica di quanto differiscano due descrizioni della geometria: la geometria fisica e una geometria indotta dalla materia e dalla curvatura.

L'articolo ricava quantità locali chiamate k-entropie, k-energie, k-temperature e k-pressioni. Il prefisso k distingue diversi settori geometrici del modello; non indica sostanze o epoche cosmiche differenti. La loro relazione di primo principio ha la stessa struttura di bilancio della termodinamica: una variazione dell'energia è legata alla temperatura moltiplicata per una variazione di entropia, meno la pressione moltiplicata per una variazione di volume.

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

L'articolo valuta poi queste quantità in cosmologie di Friedmann in espansione: universi idealizzati standard, omogenei e isotropi su grande scala. In un regime di bassa energia e piccola curvatura, gli esempi dominati dalla materia e dalla radiazione mostrano densità locali di entropia ed energia in diminuzione, ma l'espansione genera un volume sufficiente a far crescere l'entropia totale. Al primo ordine dominante, l'energia totale tende a una costante: ciò significa che si conserva il termine prevalente a tempi molto grandi e si trascurano quelli che decadono più rapidamente con il passare del tempo.

È un risultato matematico netto. Altrettanto importante è chiarirne il confine: il calcolo viene svolto **all'interno di una teoria proposta**, e le cosmologie di Friedmann usate negli esempi concreti sono soltanto soluzioni **approssimate**, non esatte, delle equazioni complete di GfE. Queste equazioni del moto derivano dalla variazione dell'azione proposta per GfE e includono il campo G dinamico e settori geometrici di ordine superiore assenti nelle normali equazioni di Friedmann. L'articolo non osserva l'entropia mentre genera la gravità, non identifica l'energia oscura del nostro Universo e non completa una teoria della gravità quantistica.

Che cosa assume Gravity From Entropy

La relatività generale descrive la gravità attraverso la geometria dello spaziotempo. La materia dice allo spaziotempo come curvarsi, e quella curvatura dice alla materia come muoversi. GfE parte da un'azione proposta diversa: tratta oggetti legati alla metrica come operatori quantistici e costruisce la propria lagrangiana a partire da una **entropia relativa quantistica geometrica** (Geometric Quantum Relative Entropy, GQRE).

Tre termini in 120 secondi

Un **operatore quantistico** è una regola matematica che agisce su uno stato quantistico e rappresenta una quantità o una trasformazione. GfE assume che i propri oggetti legati alla metrica possano essere trattati in questo modo; l'articolo non chiede al lettore di ricostruire tale formalismo.
Una **lagrangiana** è una ricetta matematica compatta per la dinamica di una teoria. Integrandola sullo spaziotempo si ottiene un'azione; variando poi quell'azione si ricavano le equazioni di campo.
La **GQRE** è la lagrangiana specifica scelta dal modello GfE. Adatta l'idea di entropia relativa quantistica per confrontare la metrica fisica con una metrica di ordine superiore indotta dalla materia e dalla curvatura. Chiamarla entropia non la rende una normale entropia termica.

L'entropia relativa è di solito una misura della distinguibilità tra due distribuzioni di probabilità o due stati quantistici. In GfE, il confronto avviene tra la metrica fisica e una metrica di ordine superiore indotta dalla materia e dalla curvatura. «Di ordine superiore» non significa che esistano dimensioni spaziotemporali aggiuntive. Significa che il modello riunisce settori geometrici scalari, di tipo vettoriale e di tipo bivettoriale in un unico oggetto ampliato. Un **campo G** dinamico mette in relazione queste componenti e «riveste» la metrica impiegata sia nella parte gravitazionale sia in quella materiale del modello. Il quadro è costruito in modo che, nel limite di bassa energia e piccola curvatura, la sua azione si riduca all'azione di Einstein-Hilbert della relatività generale più l'azione della materia.

È facile leggere troppo in quest'ultima frase. Recuperare le equazioni di Einstein in un certo limite è un requisito di coerenza per la proposta. Non dimostra che la natura utilizzi la teoria più ampia al di fuori di quel limite.

Le equazioni di campo di GfE contengono anche un termine dinamico che il quadro definisce **termine efficace emergente di energia oscura**. In questo articolo, Bianconi identifica la densità di energia interna del modello con tale termine. «Energia oscura efficace» ne descrive il ruolo nelle equazioni. Non costituisce un'identificazione empirica con l'energia oscura inferita dalle osservazioni cosmologiche.

Tre diversi usi della parola «entropia»

L'**entropia termodinamica ordinaria** conta quanti assetti microscopici possono produrre uno stato macroscopico. L'**entropia relativa quantistica** misura quanto siano distinguibili due stati

> quantistici. La **GQRE** di questo articolo è una costruzione geometrica specifica del modello, ispirata all'entropia relativa e usata come lagrangiana gravitazionale. Nomi simili non rendono intercambiabili queste quantità; l'articolo ricava all'interno di GfE le connessioni di cui si serve.

Il risultato termodinamico esatto all'interno del modello

L'articolo lavora dapprima al livello del quadro GfE stesso. Per ogni ordine e tipo di grado di libertà geometrico, indicizzato da k, definisce:

- una k-entropia locale a partire dalla GQRE;
- una k-energia locale a partire dalla densità di energia interna del modello;
- una k-temperatura coniugata;
- e una k-pressione.

Queste quantità soddisfano localmente un primo principio. Nella notazione dell'articolo:

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

L'indice k non elenca sostanze o epoche diverse dell'Universo. Nel calcolo omogeneo e isotropo indica cinque componenti: una componente scalare; componenti temporale e spaziale separate del settore di tipo vettoriale; componenti tempo-spazio e spazio-spazio separate del settore di tipo bivettoriale. Uno scalare non possiede un indice direzionale, le componenti vettoriali distinguono le direzioni temporali da quelle spaziali e un bivettore è costruito a partire da coppie di direzioni. Ogni settore può avere una propria temperatura e una propria pressione. La k-temperatura può inoltre essere positiva o negativa, a seconda della componente corrispondente del campo G.

Non si tratta di temperature misurate collocando un termometro vicino a un orizzonte cosmologico. La temperatura standard della teoria quantistica dei campi nello spazio di de Sitter è proporzionale a H: la **temperatura di Gibbons-Hawking** è associata all'orizzonte cosmologico, mentre il **vuoto di Bunch-Davies** è lo stato quantistico standard, invariante rispetto a de Sitter, le cui correlazioni di campo generano la relativa risposta termica. L'articolo distingue esplicitamente entrambe dalle proprie k-temperature geometriche, che nell'esempio di de Sitter sono proporzionali a H^2. Qui «temperatura» è il nome di una variabile termodinamica coniugata ricavata dalle definizioni di entropia ed energia del modello.

L'identità del primo principio è dunque una vera derivazione, ma vale **all'interno del modello**: una volta accettate l'azione e le definizioni di GfE, questa struttura termodinamica ne segue matematicamente.

Perché il calcolo di Friedmann è un'approssimazione

Per trasformare il formalismo in un esempio cosmologico, l'articolo usa spaziotempi di Friedmann-Robertson-Walker (FRW), omogenei e isotropi. «Omogeneo» significa che il modello su grande scala ha le stesse proprietà medie in ogni luogo; «isotropo» significa che appare uguale in ogni direzione. Un solo fattore di scala descrive la crescita delle distanze nel tempo, la materia è rappresentata come un fluido perfetto uniforme e il parametro di Hubble H riassume il tasso di espansione. È uno sfondo idealizzato, non una mappa delle singole galassie.

Esiste però un'incompatibilità strutturale. Gli universi di Friedmann risolvono le equazioni di Einstein. In generale non risolvono le equazioni complete di GfE, di ordine superiore, che seguono anche i settori scalare, vettoriale e bivettoriale e le derivate del campo G. Le equazioni di Einstein riemergono soltanto nel limite di primo ordine, bassa energia e piccola curvatura della proposta.

L'articolo lo dichiara direttamente e tratta le soluzioni di Friedmann come approssimazioni, con un approccio paragonato all'inserimento di una soluzione di campo medio in una teoria più completa per verificare entro quali limiti l'approssimazione resti affidabile. Il regime richiede bassa energia e piccola curvatura, riassunte da $l_P H \ll 1$, dove l_P è la lunghezza di Planck. Una seconda condizione riguarda le metriche di ordine superiore: il prodotto tra quella indotta e l'inversa di quella fisica deve rimanere definito positivo.

La conclusione, quindi, non è «GfE prevede la storia del nostro Universo». È più circoscritta: **se un universo descritto da GfE può essere approssimato abbastanza bene da una familiare cosmologia di Friedmann, queste sono le leggi di scala termodinamiche che emergono dalle quantità complete di GfE.**

Il risultato locale rispetto al totale

All'interno di tale regime, le principali quantità locali seguono leggi di scala semplici:

- la densità di entropia del modello è proporzionale a H^2;
- la densità di energia del modello è proporzionale a H^4;
- per gli esempi di Friedmann diversi da de Sitter, a tempi avanzati diventano approssimativamente t^{-2} e t^{-4}.

Entrambe le densità diminuiscono quindi mentre l'universo si espande. Ma una densità non è il totale.

Quando l'articolo integra sull'intera regione spaziotemporale in espansione, la crescita del volume cambia il risultato. Negli esempi fisicamente familiari dominati dalla materia e dalla radiazione, l'entropia totale cresce nel tempo anche mentre diminuisce l'entropia per unità di volume. L'energia totale non continua a crescere: al primo ordine dominante tende a una costante.

È il risultato concettuale più utile dell'articolo. Una diminuzione locale della densità entropica non entra automaticamente in conflitto con un secondo principio globale. Una regione può diventare

localmente meno entropica per unità di volume mentre la sua entropia integrata aumenta, perché il volume dello spaziotempo cresce più rapidamente.

Il calcolo non dimostra che questa sia la corretta spiegazione microscopica della freccia termodinamica nel vero Universo. Mostra che, nella sua approssimazione di Friedmann, il quadro proposto può accogliere senza contraddizioni la differenza tra locale e globale.

Un confronto con de Sitter, ma con una temperatura diversa

L'articolo considera anche lo spazio di de Sitter, uno spaziotempo idealizzato in espansione esponenziale con H costante. Per un singolo osservatore integra soltanto su un **diamante causale** finito: l'intersezione tra il cono di luce futuro di un evento precedente e il cono di luce passato di un evento successivo, che delimita la regione dello spaziotempo capace di partecipare alle osservazioni tra i due eventi. Su quel diamante, l'entropia totale di GfE è proporzionale a H^{-2}, la stessa dipendenza da H della nota entropia di Gibbons-Hawking. L'energia totale di GfE è dell'ordine dell'unità nelle unità del modello.

> **Un'unica famiglia di sfondi cosmologici**
>
> FRW è una famiglia di geometrie omogenee e isotrope, non un luogo aggiuntivo. Gli universi dominati dalla materia e dalla radiazione sono casi FRW distinti da ciò che riempie il modello. Anche lo spazio di de Sitter può essere scritto in forma FRW, ma rappresenta un caso dominato dal vuoto, con H costante ed espansione esponenziale. Il diamante causale è una regione finita scelta all'interno di quello spaziotempo per un osservatore; non è un altro tipo di universo.

La coincidenza di una legge di scala non equivale alla derivazione dello stesso oggetto fisico. La k-temperatura associata in GfE è proporzionale a H^2, a differenza della temperatura standard di de Sitter, proporzionale a H. L'articolo interpreta questa differenza come un indizio che la k-temperatura appartenga alla geometria dello spaziotempo, anziché ai campi quantistici che vivono su quello sfondo.

Suggerisce poi che una temperatura simile *potrebbe* essere associata a radiazione gravitazionale anziché all'emissione di particelle ordinarie. È una domanda per ricerche future, non un risultato dell'articolo. Per stabilire se le sue temperature corrispondano davvero a una radiazione, la teoria dovrebbe prima essere quantizzata.

Che cosa questo studio non dimostra

- **Non** mostra osservativamente che la gravità emerga dall'entropia.
- **Non** stabilisce che il termine efficace del modello sia l'energia oscura misurata in cosmologia.
- **Non** sostituisce la relatività generale con una teoria superiore già verificata. La relatività generale

compare qui come limite di bassa energia e piccola curvatura della proposta.
- **Non** rende le cosmologie di Friedmann soluzioni esatte di GfE. Sono l'approssimazione impiegata per stimare il comportamento termodinamico del modello.
- **Non** ricava un conteggio microscopico completo dei gradi di libertà dello spaziotempo.
- **Non** fornisce una teoria completa della gravità quantistica né rileva gravitoni.
- **Non** mostra che le k-temperature negative siano normali letture negative di un termometro.

Quanto è solido il risultato?

Questo è un articolo teorico sottoposto a revisione paritaria, quindi «prova» ha qui un significato diverso da quello che avrebbe in un esperimento. Le domande appropriate sono se le definizioni siano coerenti, se le derivazioni seguano correttamente e se le approssimazioni siano dichiarate e controllate.

Su questo piano, l'articolo fornisce un dizionario termodinamico concreto per GfE e ricava una struttura da primo principio anziché affidarsi soltanto all'analogia. Rende inoltre insolitamente visibile il confine dell'approssimazione: le soluzioni di Friedmann vengono prese dalla relatività generale, inserite nelle quantità di GfE e limitate a un regime in cui la metrica indotta resta ben definita.

Le affermazioni fisiche più ampie restano aperte. Il quadro è recente, l'articolo non confronta la propria cosmologia con i dati e alcune delle implicazioni più interessanti — quantizzazione, dinamica di geometria di contatto e possibile radiazione gravitazionale — vengono presentate come direzioni per lavori futuri. La coerenza interna è necessaria per una nuova teoria della gravità. Non basta a mostrare che la teoria descriva la natura.

Perché è importante

Il rapporto tra gravità e termodinamica è antico e profondo, dall'entropia dei buchi neri alla temperatura dello spazio di de Sitter. Molti di questi risultati sono organizzati intorno agli orizzonti. GfE cerca invece di costruire una misura informativa locale e volumetrica direttamente dal rapporto tra materia e geometria.

Se la proposta resisterà è una domanda aperta. Ma l'esercizio termodinamico mette in luce un obiettivo utile per qualunque teoria simile: dovrebbe spiegare come la struttura locale e una densità entropica locale in diminuzione possano coesistere con un'entropia totale crescente in un universo in espansione.

Questo articolo mostra un modo matematicamente esplicito in cui ciò può accadere. Il suo valore non sta nell'aver chiuso il problema gravità-entropia, ma nell'aver trasformato una parte del problema in equazioni di cui è possibile dichiarare con chiarezza presupposti, limiti e verifiche successive.

In breve

Bianconi ricava una descrizione termodinamica all'interno di Gravity From Entropy, un quadro proposto di gravità modificata basato su un'entropia relativa quantistica geometrica. Le variabili locali di entropia, energia, temperatura e pressione del modello soddisfano un primo principio. Quando le quantità complete di GfE vengono valutate su approssimazioni di Friedmann a bassa energia e piccola curvatura, le densità locali di entropia ed energia diminuiscono mentre l'universo si espande, ma l'entropia totale cresce perché aumenta il volume dello spaziotempo; al primo ordine dominante, negli esempi dominati dalla materia e dalla radiazione, l'energia totale tende a una costante. Un diamante causale di de Sitter produce un'entropia proporzionale a H^{-2}, ma una temperatura del modello distinta dalla normale temperatura dell'orizzonte. Sono risultati matematici condizionati all'interno di GfE, non prove osservative che la gravità derivi dall'entropia, una misura dell'energia oscura o una teoria completa della gravità quantistica.

Fonti

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