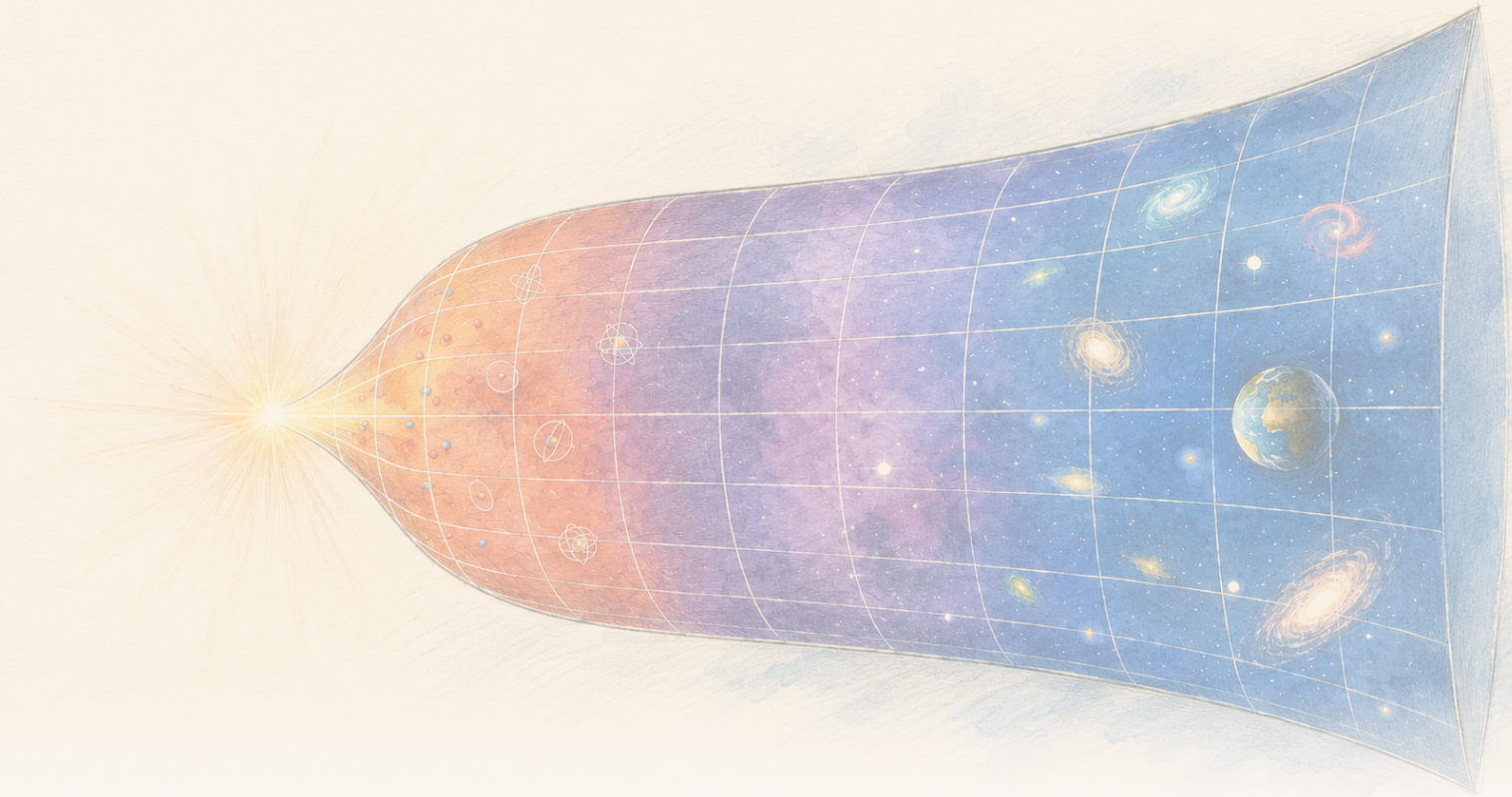

The Clean Paper

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

Dentro de un modelo de gravedad basado en entropía, la densidad local de entropía disminuye mientras aumenta el total

Un artículo de Physical Review D deriva temperaturas, presiones y una primera ley dentro de Gravity From Entropy, un marco propuesto de gravedad modificada. En una aproximación de Friedmann a tiempos tardíos y baja curvatura, las densidades locales de entropía y energía del modelo disminuyen, mientras que la expansión hace aumentar la entropía total. El cálculo es internamente concreto, pero condicional: las cosmologías de Friedmann no son soluciones exactas de la teoría completa, y esto no constituye evidencia observacional de que la gravedad proceda de la entropía, una explicación de la energía oscura medida ni una teoría completa de gravedad cuántica.

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 volumen creciente puede reducir una densidad y, al mismo tiempo, aumentar el total

Si la densidad de entropía de este modelo disminuye a medida que el universo se expande, ¿cómo puede seguir aumentando su entropía total?

Imagine un universo en expansión dividido en pequeñas celdas. La cantidad de algo dentro de cada celda puede disminuir mientras aumenta la cantidad total en toda la región que crece. Una caída de la densidad y un aumento del total no son opuestos cuando también cambia el propio volumen.

Ese problema elemental de contabilidad se encuentra en el centro de un artículo teórico mucho más ambicioso. En Physical Review D, la física matemática Ginestra Bianconi desarrolla una descripción termodinámica de **Gravity From Entropy** —Gravedad a partir de la Entropía, GfE—, un modelo propuesto recientemente en el que la gravedad se codifica mediante una relación basada en teoría de la información entre la materia y la geometría. Aquí, «basada en teoría de la información» significa que el modelo parte de una medida matemática de cuánto difieren dos descripciones de la geometría: la geometría física y otra inducida por la materia y la curvatura.

El artículo deriva magnitudes locales llamadas k-entropías, k-energías, k-temperaturas y k-presiones. El prefijo k separa distintos sectores geométricos del modelo; no son sustancias diferentes ni eras cósmicas distintas. Su relación de primera ley tiene la misma forma contable que en termodinámica: un cambio de energía está relacionado con una temperatura multiplicada por un cambio de entropía, menos una presión multiplicada por un cambio de volumen.

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

El artículo evalúa después esas magnitudes utilizando cosmologías de Friedmann en expansión: universos idealizados estándar, homogéneos e isótropos a gran escala. En un régimen de baja energía y pequeña curvatura, los ejemplos dominados por materia y radiación presentan densidades locales decrecientes de entropía y energía, pero la expansión aporta suficiente volumen para que aumente la entropía total. La energía total se aproxima a una constante en el orden dominante, es decir, después de conservar el término principal a tiempos grandes y descartar los términos que se desvanecen más deprisa conforme pasa el tiempo.

Es un resultado matemático limpio. Su frontera es igualmente importante: el cálculo se realiza **dentro de una única teoría propuesta**, y las cosmologías de Friedmann empleadas en los ejemplos concretos son solo **aproximaciones**, no soluciones exactas de las ecuaciones completas de GfE. Esas ecuaciones de movimiento proceden de variar la acción propuesta de GfE e incluyen el campo G dinámico y sectores geométricos de orden superior ausentes de las ecuaciones ordinarias de Friedmann. El artículo no observa que la entropía genere gravedad, no identifica la energía oscura de nuestro Universo ni completa una teoría de gravedad cuántica.

Qué supone Gravity From Entropy

La relatividad general describe la gravedad mediante la geometría del espacio-tiempo. La materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse y esa curvatura le dice a la materia cómo moverse. GfE parte de una acción propuesta diferente: trata objetos relacionados con la métrica como operadores cuánticos y construye su lagrangiano a partir de una **entropía relativa cuántica geométrica** —GQRE—.

Tres términos en 120 segundos

Un **operador cuántico** es una regla matemática que actúa sobre un estado cuántico y representa una magnitud o transformación. GfE supone que sus objetos relacionados con la métrica pueden tratarse así; el artículo no pide al lector que reproduzca esa construcción.
Un **lagrangiano** es una receta matemática compacta para la dinámica de una teoría. Al integrarlo sobre el espacio-tiempo se obtiene una acción, y al variar esa acción se derivan las ecuaciones de campo.
La **GQRE** es el lagrangiano específico elegido por GfE. Adapta la idea de entropía relativa cuántica para comparar la métrica física con una métrica de orden superior inducida por la materia y la curvatura. Llamarla entropía no la convierte en entropía térmica ordinaria.

La entropía relativa suele ser una medida de la distinguibilidad entre dos distribuciones de probabilidad o estados cuánticos. En GfE, la comparación se establece entre la métrica física y una métrica de orden superior inducida por la materia y la curvatura. «De orden superior» no significa dimensiones adicionales del espacio-tiempo. Significa que el modelo agrupa sectores geométricos escalares, de tipo vectorial y de tipo bivectorial dentro de un objeto ampliado. Un **campo G** dinámico relaciona estos componentes y «viste» la métrica utilizada tanto en la parte gravitatoria como en la parte material del modelo. El marco está construido para que, en un límite de baja energía y pequeña curvatura, su acción se reduzca a la acción de Einstein-Hilbert de la relatividad general más la acción de la materia.

Es fácil leer demasiado en esa última frase. Recuperar las ecuaciones de Einstein en un límite es un objetivo de consistencia para la propuesta. No demuestra que la naturaleza utilice la teoría ampliada fuera de ese límite.

Las ecuaciones de campo de GfE también contienen un término dinámico al que el marco denomina **término efectivo emergente de energía oscura**. En este artículo, Bianconi identifica la densidad de energía interna del modelo con ese término. «Energía oscura efectiva» describe su función dentro de las ecuaciones. No es una identificación empírica con la energía oscura inferida de las observaciones cosmológicas.

Tres usos distintos de la palabra «entropía»

La **entropía termodinámica ordinaria** cuenta cuántas configuraciones microscópicas pueden producir un estado macroscópico. La **entropía relativa cuántica** mide cuánto pueden distinguirse dos estados cuánticos. La **GQRE** de este artículo es una construcción geométrica específica del modelo, inspirada en la entropía relativa y utilizada como lagrangiano gravitatorio.

> Que los nombres se parezcan no hace intercambiables estas magnitudes; el artículo deriva las conexiones que emplea dentro de GfE.

El resultado termodinámico exacto dentro del modelo

El artículo trabaja primero al nivel del propio marco GfE. Para cada orden y tipo de grado de libertad geométrico, indexado por k, define:

- una k-entropía local a partir de la GQRE;
- una k-energía local a partir de la densidad de energía interna del modelo;
- una k-temperatura conjugada;
- y una k-presión.

Estas magnitudes obedecen una primera ley local. En la notación del artículo,

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

El índice k no es una lista de sustancias o épocas distintas del Universo. En el cálculo homogéneo e isótropo etiqueta cinco entradas: una escalar; entradas temporales y espaciales independientes del sector de tipo vectorial; y entradas tiempo-espacio y espacio-espacio independientes del sector de tipo bivectorial. Un escalar no posee índice direccional; las entradas de tipo vectorial distinguen direcciones temporales de espaciales; y un bivector se construye a partir de pares de direcciones. Cada sector puede tener su propia temperatura y presión. La k-temperatura también puede ser positiva o negativa, según el componente correspondiente del campo G.

No son temperaturas medidas colocando un termómetro cerca de un horizonte cosmológico. La temperatura estándar de teoría cuántica de campos en de Sitter escala con H: la **temperatura de Gibbons-Hawking** se asigna al horizonte cosmológico, mientras que el **vacío de Bunch-Davies** es el estado cuántico estándar invariante de de Sitter cuyas correlaciones de campo producen la respuesta térmica asociada. El artículo distingue explícitamente ambas de sus k-temperaturas geométricas, que escalan con H^2 en el ejemplo de de Sitter. Aquí, «temperatura» designa una variable termodinámica conjugada derivada de las definiciones de entropía y energía del modelo.

Por tanto, la identidad de primera ley es una derivación real, pero constituye un **resultado interno**: si se aceptan la acción y las definiciones de GfE, esa estructura termodinámica se sigue de ellas.

Por qué el cálculo de Friedmann es una aproximación

Para convertir el formalismo en un ejemplo cosmológico, el artículo utiliza espacios-tiempo homogéneos e isótropos de Friedmann-Robertson-Walker —FRW—. «Homogéneo» significa que el modelo a

gran escala tiene las mismas propiedades medias en todos los lugares; «isótropo» significa que se ve igual en todas las direcciones. Un único factor de escala describe cómo crecen las distancias con el tiempo, la materia se representa como un fluido perfecto uniforme y el parámetro de Hubble H resume la velocidad de expansión. Es un fondo idealizado, no un mapa de galaxias individuales.

Pero existe una incompatibilidad estructural. Los universos de Friedmann resuelven las ecuaciones de Einstein. En general no resuelven las ecuaciones completas de orden superior de GfE, que también siguen los sectores escalar, vectorial y bivectorial y las derivadas del campo G. Las ecuaciones de Einstein reaparecen únicamente en el límite de primer orden, baja energía y pequeña curvatura de la propuesta.

El artículo lo dice de forma directa y trata las soluciones de Friedmann como aproximaciones, mediante un enfoque comparado con insertar una solución de campo medio dentro de una teoría más completa para comprobar dónde sigue siendo fiable esa aproximación. El régimen exige baja energía y pequeña curvatura, resumidas mediante $l_P H \ll 1$, donde l_P es la longitud de Planck. Una segunda condición requiere que el producto entre la métrica inducida de orden superior y la inversa de la métrica física de orden superior permanezca definido positivo.

Por tanto, el resultado no es «GfE predice la historia de nuestro Universo». Se acerca más a lo siguiente: **si un universo GfE queda suficientemente bien aproximado por una cosmología familiar de Friedmann, estas son las leyes de escala termodinámicas producidas por las magnitudes completas de GfE.**

El resultado local frente al total

Dentro de ese régimen, las magnitudes locales dominantes presentan leyes de escala sencillas:

- la densidad de entropía del modelo escala como H^2;
- la densidad de energía del modelo escala como H^4;
- para ejemplos de Friedmann que no sean de Sitter, a tiempos tardíos se convierten aproximadamente en t^{-2} y t^{-4}.

Por tanto, ambas densidades disminuyen mientras se expande el universo. Pero una densidad no es el total.

Cuando el artículo integra sobre la región de espacio-tiempo en expansión, el volumen creciente cambia la respuesta. En los ejemplos físicamente familiares dominados por materia y radiación, la entropía total aumenta con el tiempo aunque disminuya la entropía por unidad de volumen. La energía total no continúa creciendo; en el orden dominante se aproxima a una constante.

Este es el resultado conceptual más útil del artículo. El ordenamiento o la dilución local no entran automáticamente en conflicto con una segunda ley global. Una región puede volverse localmente menos entrópica por unidad de volumen mientras aumenta la entropía integrada porque el volumen de espacio-tiempo crece más deprisa.

El cálculo no demuestra que esta sea la explicación microscópica correcta de la flecha termodinámica en el Universo real. Muestra que el marco propuesto puede albergar la separación entre lo local y lo global sin contradicción dentro de su aproximación de Friedmann.

Una comparación con de Sitter, pero con una temperatura diferente

El artículo también considera el espacio de de Sitter, un espacio-tiempo idealizado en expansión exponencial con H constante. Para un único observador integra solo sobre un **diamante causal** finito: la intersección entre el cono de luz futuro de un acontecimiento anterior y el cono de luz pasado de uno posterior, que delimita la región de espacio-tiempo capaz de participar en observaciones entre ambos. Sobre ese diamante, la entropía total de GfE escala como H^{-2}, la misma dependencia de H que la conocida entropía de Gibbons-Hawking. La energía total de GfE es de orden uno en las unidades del modelo.

> **Una familia de fondos cosmológicos**
>
> FRW es una familia de geometrías homogéneas e isótropas, no un lugar adicional. Los universos dominados por materia y radiación son casos FRW diferenciados por aquello que llena el modelo. El espacio de de Sitter también puede escribirse en forma FRW, pero representa un caso dominado por vacío con H constante y expansión exponencial. El diamante causal es una región finita seleccionada dentro de ese espacio-tiempo para un observador; no es otro tipo de universo.

Que coincida una ley de escala no equivale a derivar el mismo objeto físico. La k-temperatura de GfE asociada escala como H^2, a diferencia de la temperatura estándar de de Sitter, que escala como H. El artículo interpreta esta diferencia como indicio de que la k-temperatura pertenece a la geometría del espacio-tiempo y no a campos cuánticos que viven sobre ese fondo.

Después sugiere que una temperatura así *podría* asociarse con radiación de gravitones en lugar de emisión ordinaria de partículas. Es una pregunta futura, no un resultado del artículo. La teoría tendría primero que cuantizarse para establecer si sus temperaturas corresponden a radiación en absoluto.

Lo que esto no demuestra

- **No** demuestra mediante observaciones que la gravedad emerja de la entropía.
- **No** establece que el término efectivo del modelo sea la energía oscura medida en cosmología.
- **No** sustituye la relatividad general por una teoría superior puesta a prueba. La relatividad general aparece aquí como límite de baja energía y pequeña curvatura de la propuesta.

- **No** convierte las cosmologías de Friedmann en soluciones exactas de GfE. Son la aproximación utilizada para estimar el comportamiento termodinámico del modelo.
- **No** deriva un recuento microscópico completo de los grados de libertad del espacio-tiempo.
- **No** ofrece una teoría terminada de gravedad cuántica ni detecta gravitones.
- **No** demuestra que las k-temperaturas negativas sean lecturas ordinarias negativas de un termómetro.

¿Qué solidez tiene el resultado?

Se trata de un artículo teórico revisado por pares, por lo que «evidencia» significa aquí algo distinto que en un experimento. Las preguntas apropiadas son si las definiciones son coherentes, si las derivaciones se siguen y si las aproximaciones están declaradas y controladas.

En ese nivel, el artículo aporta un diccionario termodinámico concreto para GfE y deriva una estructura de primera ley en lugar de apoyarse solo en una analogía. También hace excepcionalmente visible la frontera de la aproximación: las soluciones de Friedmann se toman prestadas de la relatividad general, se insertan en las magnitudes de GfE y se restringen a un régimen en el que la métrica inducida sigue comportándose correctamente.

Las afirmaciones físicas más amplias continúan abiertas. El marco es reciente, este artículo no compara su cosmología con datos y algunas de sus implicaciones más interesantes —cuantización, dinámica de geometría de contacto y posible radiación de gravitones— se presentan como líneas futuras de trabajo. La consistencia interna es necesaria para una nueva teoría gravitatoria. No basta para demostrar que la teoría describe la naturaleza.

Por qué importa

La relación entre gravedad y termodinámica es antigua y profunda, desde la entropía de los agujeros negros hasta la temperatura del espacio de de Sitter. Muchos de esos resultados se organizan alrededor de horizontes. GfE intenta, en cambio, construir una medida informacional local y volumétrica directamente a partir de la relación entre materia y geometría.

Sigue abierta la cuestión de si la propuesta sobrevivirá. Pero el ejercicio termodinámico expone un objetivo útil para cualquier teoría de este tipo: debería explicar cómo pueden coexistir una estructura local y una densidad local de entropía decreciente con una entropía total creciente dentro de un universo en expansión.

Este artículo muestra una manera matemáticamente explícita en que puede ocurrir. Su valor no está en cerrar el problema gravedad-entropía. Convierte una parte de ese problema en ecuaciones cuyos supuestos, límites y pruebas siguientes pueden expresarse con claridad.

En pocas palabras

Bianconi deriva una descripción termodinámica dentro de Gravity From Entropy, un marco propuesto de gravedad modificada basado en una entropía relativa cuántica geométrica. Las variables locales de entropía, energía, temperatura y presión del modelo satisfacen una primera ley. Cuando las magnitudes completas de GfE se evalúan sobre aproximaciones de Friedmann de baja energía y pequeña curvatura, las densidades locales de entropía y energía disminuyen mientras el universo se expande, pero la entropía total aumenta porque crece el volumen del espacio-tiempo; la energía total se aproxima a una constante en el orden dominante en los ejemplos dominados por materia y radiación. Un diamante causal de de Sitter produce una entropía que escala como H^{-2}, pero una temperatura del modelo distinta de la temperatura estándar del horizonte. Son resultados matemáticos condicionales dentro de GfE, no pruebas observacionales de que la gravedad proceda de la entropía, una medición de la energía oscura ni una teoría completa de gravedad cuántica.

Fuentes

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