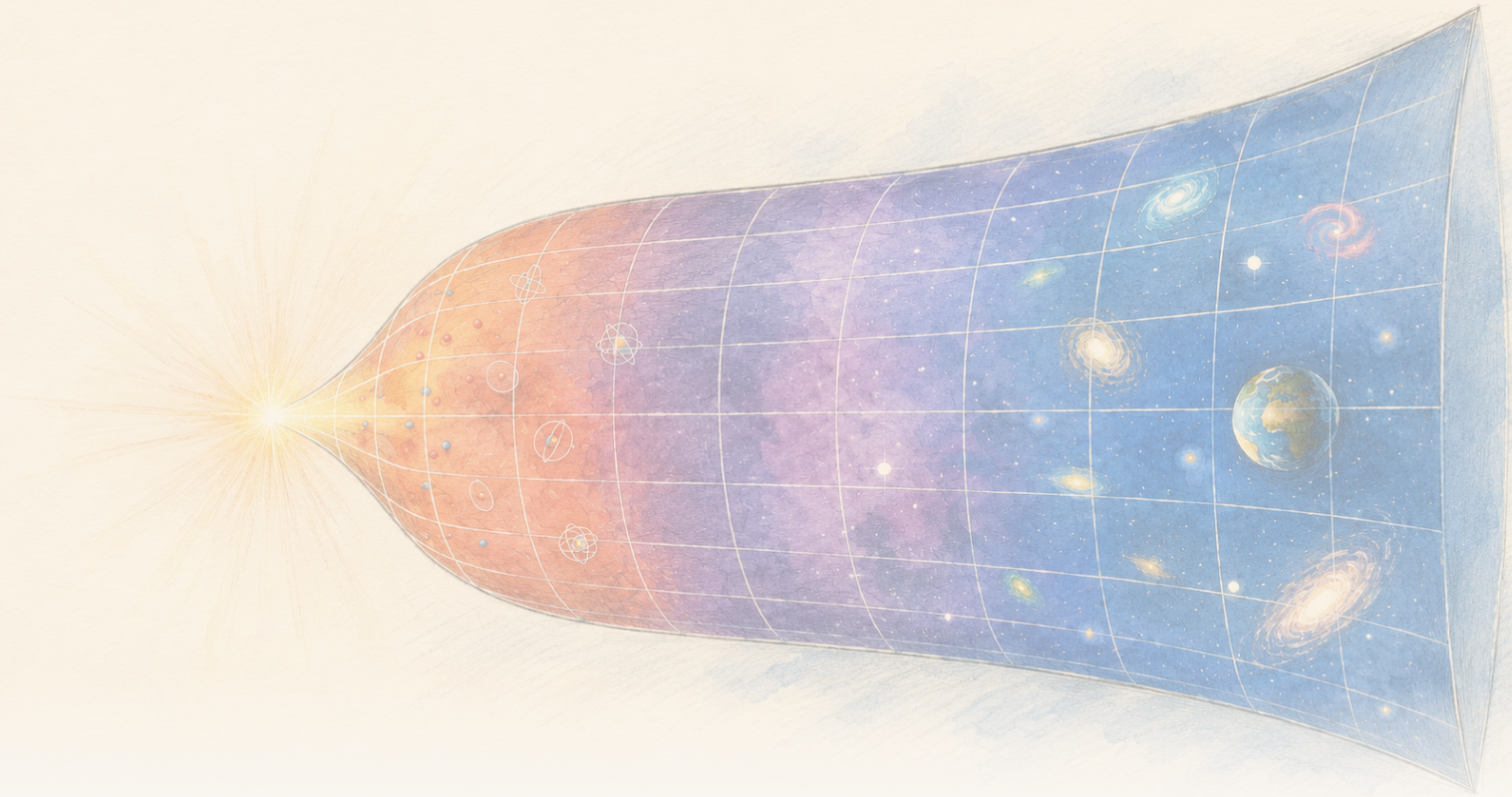

The Clean Paper

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

In einem entropiebasierten Gravitationsmodell sinkt die lokale Entropiedichte, während die Gesamtentropie wächst

Eine Arbeit in Physical Review D leitet innerhalb von Gravity From Entropy, einem vorgeschlagenen Rahmen modifizierter Gravitation, Temperaturen, Drücke und einen ersten Hauptsatz her. In einer spätzeitlichen Friedmann-Näherung mit geringer Krümmung sinken die lokalen Entropie- und Energiedichten des Modells, während die Expansion die Gesamtentropie wachsen lässt. Die Rechnung ist intern konkret, aber bedingt: Friedmann-Kosmologien sind keine exakten Lösungen der vollständigen Theorie, und dies ist kein Beobachtungsbeleg dafür, dass Gravitation aus Entropie entsteht, keine Erklärung der gemessenen dunklen Energie und keine abgeschlossene Quantengravitationstheorie.

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

Ein wachsendes Volumen kann eine Dichte senken und zugleich die Gesamtmenge erhöhen

Wenn in diesem Modell die Entropiedichte beim Expandieren eines Universums sinkt, wie kann dann die Gesamtentropie trotzdem zunehmen?

Stellen Sie sich ein expandierendes Universum vor, das in winzige Zellen unterteilt ist. Die Menge einer Größe in jeder Zelle kann sinken, während ihre Gesamtmenge über die wachsende Region steigt. Ein Rückgang der Dichte und ein Anstieg der Gesamtmenge sind keine Gegensätze, wenn sich das Volumen selbst verändert.

Dieses elementare Bilanzproblem steht im Zentrum einer erheblich ehrgeizigeren theoretischen Arbeit. In Physical Review D entwickelt die mathematische Physikerin Ginestra Bianconi eine thermodynamische Beschreibung von **Gravity From Entropy** (GfE), einem kürzlich vorgeschlagenen Modell, in dem Gravitation über eine informationstheoretische Beziehung zwischen Materie und Geometrie kodiert wird. „Informationstheoretisch“ bedeutet hier, dass das Modell von einem mathematischen Maß dafür ausgeht, wie sich zwei Beschreibungen der Geometrie unterscheiden: die physische Geometrie und eine durch Materie und Krümmung induzierte.

Die Arbeit leitet lokale Größen ab, die k-Entropien, k-Energien, k-Temperaturen und k-Drücke genannt werden. Das Präfix k trennt verschiedene geometrische Sektoren des Modells; es bezeichnet weder verschiedene Substanzen noch kosmische Epochen. Ihre Beziehung des ersten Hauptsatzes hat dieselbe Bilanzform wie in der Thermodynamik: Eine Energieänderung hängt mit Temperatur mal Entropieänderung minus Druck mal Volumenänderung zusammen.

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

Anschließend wertet die Arbeit diese Größen in expandierenden Friedmann-Kosmologien aus: standardisierten idealisierten Universen, die im großen Maßstab homogen und isotrop sind. In einem Bereich niedriger Energie und kleiner Krümmung zeigen die materie- und strahlungsdominierten Beispiele sinkende lokale Entropie- und Energiedichten, doch die Expansion liefert genügend Volumen, damit die Gesamtentropie zunimmt. Die Gesamtenergie nähert sich in führender Ordnung einer Konstante; das bedeutet, dass der bei großen Zeiten dominierende Term behalten und schneller abklingende Terme weggelassen werden.

Das ist ein sauberes mathematisches Ergebnis. Seine Grenze ist ebenso wichtig: Die Rechnung erfolgt **innerhalb einer vorgeschlagenen Theorie**, und die Friedmann-Kosmologien der konkreten Beispiele sind nur **Näherungen**, keine exakten Lösungen der vollständigen GfE-Gleichungen. Diese Bewegungsgleichungen entstehen durch Variation der vorgeschlagenen GfE-Wirkung und umfassen das dynamische G-Feld sowie geometrische Sektoren höherer Ordnung, die in den gewöhnlichen Friedmann-Gleichungen fehlen. Die Arbeit beobachtet nicht, wie Entropie Gravitation erzeugt, identifiziert nicht die dunkle Energie unseres Universums und vollendet keine Quantengravitationstheorie.

Was Gravity From Entropy annimmt

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt Gravitation durch die Geometrie der Raumzeit. Materie sagt der Raumzeit, wie sie sich krümmen soll, und die Krümmung sagt der Materie, wie sie sich bewegen soll. GfE geht von einer anderen vorgeschlagenen Wirkung aus: Es behandelt metrikbezogene Objekte als Quantenoperatoren und baut seine Lagrangedichte aus einer **Geometric Quantum Relative Entropy** (GQRE) auf.

Drei Begriffe in 120 Sekunden

Ein **Quantenoperator** ist eine mathematische Vorschrift, die auf einen Quantenzustand wirkt und eine Größe oder Transformation darstellt. GfE nimmt an, dass seine metrikbezogenen Objekte so behandelt werden können; der Artikel verlangt nicht, diese Konstruktion nachzuvollziehen.

Eine **Lagrangedichte** ist ein kompaktes mathematisches Rezept für die Dynamik einer Theorie. Integriert man sie über die Raumzeit, erhält man eine Wirkung; durch Variation dieser Wirkung werden die Feldgleichungen abgeleitet.

Die **GQRE** ist die modelspezifische Lagrangedichte von GfE. Sie passt die Idee der quantenmechanischen relativen Entropie an, um die physische Metrik mit einer durch Materie und Krümmung induzierten Metrik höherer Ordnung zu vergleichen. Dass sie „Entropie“ heißt, macht sie nicht zu gewöhnlicher Wärmeentropie.

Relative Entropie ist gewöhnlich ein Maß der Unterscheidbarkeit zweier Wahrscheinlichkeitsverteilungen oder Quantenzustände. In GfE vergleicht sie die physische Metrik mit einer durch Materie und Krümmung induzierten Metrik höherer Ordnung. „Höhere Ordnung“ bedeutet keine zusätzlichen Raumzeitdimensionen. Es bedeutet, dass das Modell skalare, vektorartige und bivektorartige geometrische Sektoren zu einem erweiterten Objekt zusammenfasst. Ein dynamisches **G-Feld** verbindet diese Komponenten und „kleidet“ die Metrik, die sowohl im Gravitations- als auch im Materieteil des Modells verwendet wird. Der Rahmen ist so konstruiert, dass seine Wirkung im Grenzfall niedriger Energie und kleiner Krümmung auf die Einstein-Hilbert-Wirkung der Allgemeinen Relativitätstheorie plus Materiewirkung zurückgeht.

Dieser letzte Satz lässt sich leicht überlesen. Einsteins Gleichungen in einem Grenzfall zurückzugewinnen, ist ein Konsistenzziel des Vorschlags. Es zeigt nicht, dass die Natur außerhalb dieses Grenzfalls die größere Theorie verwendet.

Die GfE-Feldgleichungen enthalten außerdem einen dynamischen Term, den der Rahmen als **emergenten effektiven Dunkelenergie-Term** bezeichnet. In dieser Arbeit identifiziert Bianconi die innere Energiedichte des Modells mit diesem Term. „Effektive dunkle Energie“ beschreibt seine Rolle in den Gleichungen. Es ist keine empirische Identifikation mit der aus kosmologischen Beobachtungen erschlossenen dunklen Energie.

Drei verschiedene Verwendungen des Wortes „Entropie“

Gewöhnliche thermodynamische Entropie zählt, wie viele mikroskopische Anordnungen einen makroskopischen Zustand erzeugen können. **Quantenrelative Entropie** misst, wie unterscheidbar zwei Quantenzustände sind. Die **GQRE** dieser Arbeit ist eine modelspezifische geometrische Konstruktion, die von relativer Entropie inspiriert ist und als gravitative Lagrangedichte dient. Ähnliche Namen machen diese Größen nicht austauschbar; die Arbeit leitet die innerhalb von GfE verwendeten Beziehungen her.

Das exakte thermodynamische Ergebnis innerhalb des Modells

Die Arbeit beginnt auf der Ebene des GfE-Rahmens selbst. Für jede Ordnung und Art geometrischer Freiheitsgrade, indiziert durch k, definiert sie:

- eine lokale k-Entropie aus der GQRE;
- eine lokale k-Energie aus der inneren Energiedichte des Modells;
- eine konjugierte k-Temperatur;
- und einen k-Druck.

Diese Größen erfüllen einen lokalen ersten Hauptsatz. In der Notation der Arbeit:

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

Der Index k ist keine Liste verschiedener Substanzen oder Epochen des Universums. In der homogenen und isotropen Rechnung bezeichnet er fünf Einträge: einen skalaren Eintrag; getrennte zeitartige und raumartige Einträge aus dem vektorartigen Sektor; sowie getrennte Zeit-Raum- und Raum-Raum-Einträge aus dem bivektorartigen Sektor. Ein Skalar besitzt keinen Richtungsindex, die vektorartigen Einträge unterscheiden zeitliche von räumlichen Richtungen, und ein Bivektor wird aus Richtungspaaren aufgebaut. Jeder Sektor kann seine eigene Temperatur und seinen eigenen Druck tragen. Die k-Temperatur kann je nach zugehöriger G-Feld-Komponente positiv oder negativ sein.

Dies sind keine Temperaturen, die durch ein Thermometer nahe einem kosmologischen Horizont gemessen werden. Die Standardtemperatur der Quantenfeldtheorie in de Sitter skaliert mit H: Die **Gibbons-Hawking-Temperatur** wird dem kosmologischen Horizont zugeordnet, während das **Bunch-Davies-Vakuum** der de-Sitter-invariante Standardquantenzustand ist, dessen Feldkorrelationen die zugehörige thermische Antwort liefern. Die Arbeit unterscheidet beide ausdrücklich von ihren geometrischen k-Temperaturen, die im de-Sitter-Beispiel mit H^2 skalieren. „Temperatur“ bezeichnet hier eine thermodynamisch konjugierte Variable, die aus den Entropie- und Energiedefinitionen des Modells abgeleitet wird.

Die Identität des ersten Hauptsatzes ist daher eine echte Herleitung, aber ein **internes Ergebnis**:

Akzeptiert man GfE-Wirkung und Definitionen, folgt diese thermodynamische Struktur.

Warum die Friedmann-Rechnung eine Näherung ist

Um den Formalismus in ein kosmologisches Beispiel zu überführen, verwendet die Arbeit homogene und isotrope Friedmann-Robertson-Walker-Raumzeiten (FRW). „Homogen“ bedeutet, dass das großräumige Modell an jedem Ort dieselben mittleren Eigenschaften besitzt; „isotrop“ bedeutet, dass es in jede Richtung gleich aussieht. Ein Skalenfaktor beschreibt, wie Entfernungen mit der Zeit wachsen, Materie wird als glatte perfekte Flüssigkeit dargestellt, und der Hubble-Parameter H fasst die Expansionsrate zusammen. Dies ist ein idealisierter Hintergrund, keine Karte einzelner Galaxien.

Es gibt jedoch eine strukturelle Diskrepanz. Friedmann-Universen lösen Einsteins Gleichungen. Im Allgemeinen lösen sie nicht die vollständigen GfE-Gleichungen höherer Ordnung, die zusätzlich skalare, vektorartige und bivektorartige Sektoren sowie Ableitungen des G-Feldes verfolgen. Einsteins Gleichungen erscheinen erst im Grenzfall erster Ordnung, niedriger Energie und kleiner Krümmung des Vorschlags.

Die Arbeit sagt dies direkt und behandelt Friedmann-Lösungen als Näherungen, in einem Vorgehen, das damit verglichen wird, eine Mean-Field-Lösung in eine vollständigere Theorie einzusetzen, um zu prüfen, wo die Näherung verlässlich bleibt. Der Bereich verlangt niedrige Energie und kleine Krümmung, zusammengefasst durch $l_P H \ll 1$, wobei l_P die Planck-Länge ist. Eine zweite Bedingung verlangt, dass das Produkt der induzierten Metrik höherer Ordnung und der inversen physischen Metrik höherer Ordnung positiv definit bleibt.

Das Ergebnis lautet daher nicht „GfE sagt die Geschichte unseres Universums voraus“. Es lautet eher: **Falls ein GfE-Universum durch eine vertraute Friedmann-Kosmologie hinreichend gut angenähert wird, entstehen für die vollständigen GfE-Größen diese thermodynamischen Skalierungen.**

Das lokale Ergebnis und das Gesamtergebnis

Innerhalb dieses Bereichs besitzen die führenden lokalen Größen einfache Skalierungen:

- die Modellentropiedichte skaliert wie H^2;
- die Modellenergiedichte skaliert wie H^4;
- bei spätzeitlichen nicht-de-Sitter-Friedmann-Beispielen werden daraus ungefähr t^{-2} und t^{-4}.

Beide Dichten sinken daher, während das Universum expandiert. Dichte ist jedoch nicht die Gesamtmenge.

Wenn die Arbeit über die expandierende Raumzeitregion integriert, verändert das wachsende Volumen die Antwort. In den physikalisch vertrauten materie- und strahlungsdominierten Beispielen

nimmt die Gesamtentropie mit der Zeit zu, obwohl die Entropie pro Volumeneinheit sinkt. Die Gesamtenergie wächst nicht weiter; in führender Ordnung nähert sie sich einer Konstante.

Das ist das nützlichste konzeptionelle Ergebnis der Arbeit. Lokale Ordnung oder Verdünnung widerspricht nicht automatisch einem globalen zweiten Hauptsatz. Eine Region kann lokal pro Volumen weniger entropisch werden, während die integrierte Entropie wächst, weil das Raumzeitvolumen schneller zunimmt.

Die Rechnung beweist nicht, dass dies die richtige mikroskopische Erklärung des thermodynamischen Zeitpfeils im realen Universum ist. Sie zeigt, dass der vorgeschlagene Rahmen in seiner Friedmann-Näherung die lokale-globale Trennung widerspruchsfrei aufnehmen kann.

Ein de-Sitter-Vergleich mit einer anderen Temperatur

Die Arbeit betrachtet außerdem den de-Sitter-Raum, eine idealisierte exponentiell expandierende Raumzeit mit konstantem H. Für einen einzelnen Beobachter integriert sie nur über einen endlichen **Kausaldiamanten**: die Überlappung des zukünftigen Lichtkegels eines früheren Ereignisses mit dem vergangenen Lichtkegel eines späteren Ereignisses, die die Raumzeitregion begrenzt, die zwischen beiden an Beobachtungen teilnehmen kann. Über diesen Diamanten skaliert die gesamte GfE-Entropie wie H^{-2}, also mit derselben H-Skalierung wie die bekannte Gibbons-Hawking-Entropie. Die gesamte GfE-Energie ist in den Einheiten des Modells von der Größenordnung eins.

> **Eine Familie kosmologischer Hintergründe**
>
> FRW ist eine Familie homogener und isotroper Geometrien, kein zusätzlicher Ort. Materie- und strahlungsdominierte Universen sind FRW-Fälle, die sich durch den Inhalt des Modells unterscheiden. Auch de-Sitter-Raum kann in FRW-Form geschrieben werden, stellt aber einen vakuumdominierten Fall mit konstantem H und exponentieller Expansion dar. Der Kausaldiamant ist eine endliche, für einen Beobachter ausgewählte Region innerhalb dieser Raumzeit; er ist keine weitere Art von Universum.

Die Übereinstimmung einer Skalierung ist nicht dasselbe wie die Herleitung desselben physikalischen Objekts. Die zugehörige GfE-k-Temperatur skaliert wie H^2, anders als die Standard-de-Sitter-Temperatur, die mit H skaliert. Die Arbeit deutet diesen Unterschied als Hinweis darauf, dass die k-Temperatur zur Raumzeitgeometrie und nicht zu Quantenfeldern auf diesem Hintergrund gehört.

Anschließend schlägt sie vor, eine solche Temperatur *könnte* mit Gravitonenstrahlung statt gewöhnlicher Teilchenemission verbunden sein. Das ist eine zukünftige Frage, kein Ergebnis dieser Arbeit. Die Theorie müsste zunächst quantisiert werden, um festzustellen, ob ihre Temperaturen überhaupt Strahlung entsprechen.

Was dies nicht beweist

- Es zeigt **nicht durch Beobachtungen**, dass Gravitation aus Entropie emergiert.
- Es belegt **nicht**, dass der effektive Term des Modells die in der Kosmologie gemessene dunkle Energie ist.
- Es ersetzt die Allgemeine Relativitätstheorie **nicht** durch eine getestete überlegene Theorie. Die Allgemeine Relativität erscheint hier als Grenzfall niedriger Energie und kleiner Krümmung des Vorschlags.
- Es macht Friedmann-Kosmologien **nicht** zu exakten Lösungen von GfE. Sie sind die Näherung, mit der das thermodynamische Verhalten des Modells geschätzt wird.
- Es leitet **keine** vollständige mikroskopische Zählung der Freiheitsgrade der Raumzeit her.
- Es liefert **keine** abgeschlossene Quantengravitationstheorie und detektiert keine Gravitonen.
- Es zeigt **nicht**, dass negative k-Temperaturen gewöhnliche negative Thermometeranzeigen sind.

Wie belastbar ist das Ergebnis?

Dies ist eine begutachtete theoretische Arbeit, daher bedeutet „Evidenz“ hier etwas anderes als in einem Experiment. Die angemessenen Fragen lauten, ob die Definitionen kohärent sind, ob die Herleitungen folgen und ob die Näherungen offengelegt und kontrolliert werden.

Auf dieser Ebene liefert die Arbeit ein konkretes thermodynamisches Wörterbuch für GfE und leitet eine Struktur des ersten Hauptsatzes her, statt sich nur auf eine Analogie zu stützen. Sie macht außerdem die Näherungsgrenze ungewöhnlich sichtbar: Die Friedmann-Lösungen werden aus der Allgemeinen Relativitätstheorie übernommen, in die GfE-Größen eingesetzt und auf einen Bereich beschränkt, in dem die induzierte Metrik gutartig bleibt.

Die größeren physikalischen Behauptungen bleiben offen. Der Rahmen ist jung, diese Arbeit vergleicht seine Kosmologie nicht mit Daten, und einige seiner interessantesten Folgen – Quantisierung, kontaktgeometrische Dynamik und mögliche Gravitonenstrahlung – werden als Richtungen für zukünftige Arbeit präsentiert. Interne Konsistenz ist für eine neue Gravitationstheorie notwendig. Sie reicht nicht aus, um zu zeigen, dass die Theorie die Natur beschreibt.

Warum es wichtig ist

Die Beziehung zwischen Gravitation und Thermodynamik ist alt und tief, von der Entropie Schwarzer Löcher bis zur Temperatur des de-Sitter-Raums. Viele dieser Ergebnisse sind um Horizonte organisiert. GfE versucht stattdessen, ein lokales, volumetrisches Informationsmaß direkt aus der Beziehung zwischen Materie und Geometrie aufzubauen.

Ob dieser Vorschlag Bestand hat, ist offen. Die thermodynamische Übung macht jedoch ein nützliches Ziel für jede solche Theorie sichtbar: Sie sollte erklären, wie lokale Struktur und sinkende

lokale Entropiedichte mit zunehmender Gesamtentropie in einem expandierenden Universum koexistieren können.

Diese Arbeit zeigt eine mathematisch explizite Möglichkeit dafür. Ihr Wert besteht nicht darin, das Gravitation-Entropie-Problem abzuschließen. Sie verwandelt einen Teil dieses Problems in Gleichungen, deren Annahmen, Grenzen und nächste Prüfungen klar benannt werden können.

Kurz zusammengefasst

Bianconi leitet innerhalb von Gravity From Entropy, einem vorgeschlagenen Rahmen modifizierter Gravitation auf Grundlage einer geometrischen quantenrelativen Entropie, eine thermodynamische Beschreibung her. Die lokalen Entropie-, Energie-, Temperatur- und Druckvariablen des Modells erfüllen einen ersten Hauptsatz. Werden die vollständigen GfE-Größen in Friedmann-Näherungen niedriger Energie und kleiner Krümmung ausgewertet, sinken lokale Entropie- und Energiedichten während der Expansion, während die Gesamtentropie wegen des wachsenden Raumzeitvolumens zunimmt; in materie- und strahlungsdominierten Beispielen nähert sich die Gesamtenergie in führender Ordnung einer Konstante. Ein de-Sitter-Kausaldiamant liefert eine Entropieskalierung wie H^{-2}, aber eine von der Standard-Horizonttemperatur verschiedene Modelltemperatur. Dies sind bedingte mathematische Ergebnisse innerhalb von GfE, keine Beobachtungsevidenz dafür, dass Gravitation aus Entropie entsteht, keine Messung dunkler Energie und keine abgeschlossene Quantengravitationstheorie.

Quellen

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