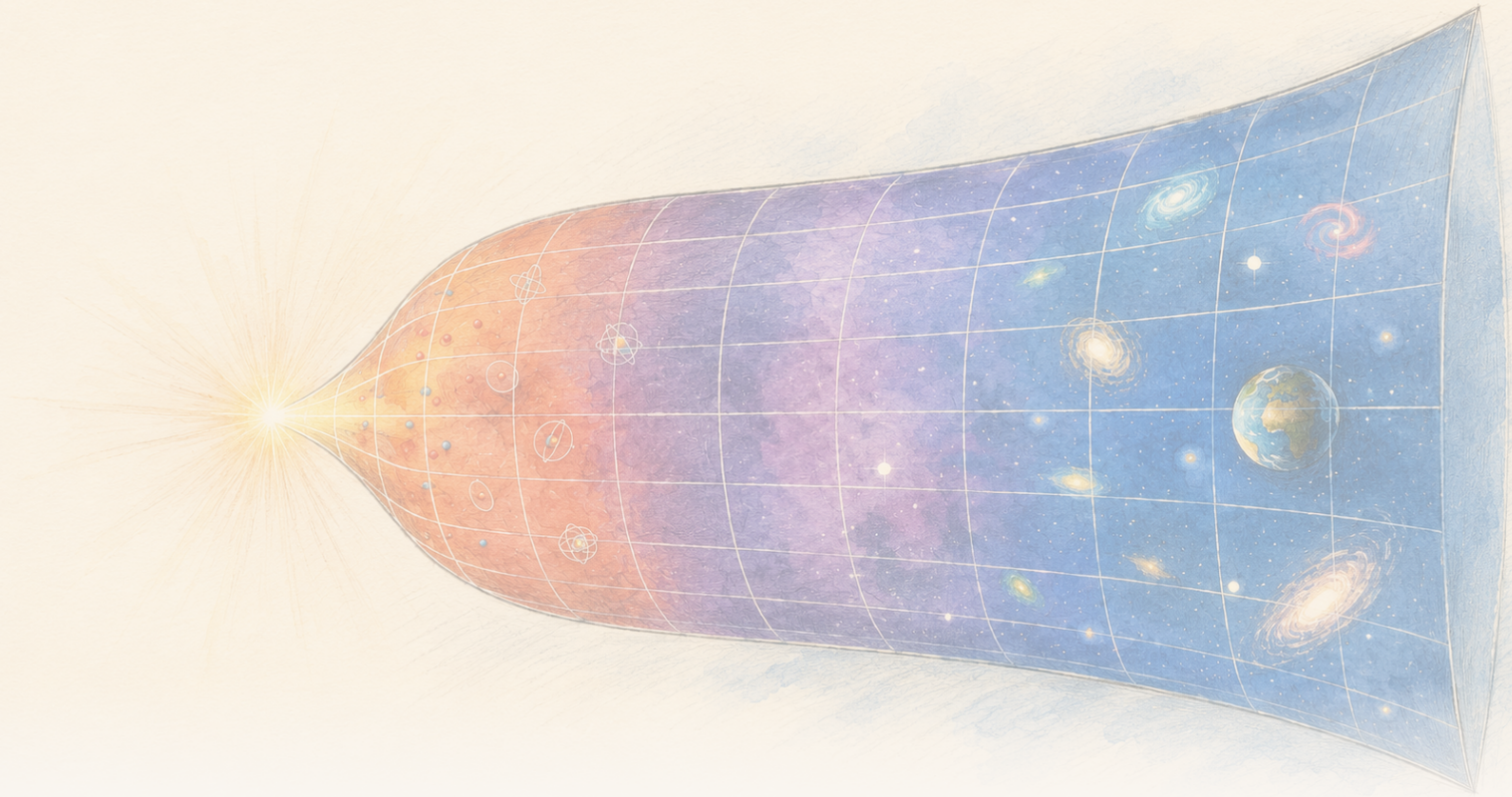

The Clean Paper

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

エントロピーに基づく重力モデルでは、局所エントロピー密度が下がっても総量は増える

Physical Review D の論文は、提案中の修正重力枠組み *Gravity From Entropy* の内部で温度、圧力、第一法則を導出した。晩期・低曲率の *Friedmann* 近似では、モデルの局所エントロピー密度とエネルギー密度は低下する一方、膨張によって総エントロピーは増える。計算は理論内部では具体的だが条件付きである。*Friedmann* 宇宙は完全な理論の厳密解ではなく、これは重力がエントロピーから生じるという観測証拠でも、測定されたダークエネルギーの説明でも、完成した量子重力理論でもない。

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

体積が増えれば、密度が下がっても総量は増えうる

このモデルで宇宙の膨張につれてエントロピー密度が下がるなら、どうして総エントロピーは増えられるのだろうか。

膨張する宇宙を小さなセルに分けると考えてみよう。各セルにある量が減っても、領域全体が大きくなれば総量は増えうる。体積そのものが変化するとき、密度低下と総量増加は反対ではない。

この単純な収支の問題が、はるかに野心的な理論論文の中心にある。Physical Review Dで数理物理学者 Ginestra Bianconi は、**Gravity From Entropy**（GfE）の熱力学的記述を発展させた。GfE は最近提案されたモデルで、物質と幾何の間の情報理論的関係を通じて重力を記述する。ここで「情報理論的」とは、物理的幾何と、物質・曲率によって誘導される幾何という 2 つの記述がどれほど違うかを測る数学量からモデルが出発することを意味する。

論文は、局所的な k-エントロピー、k-エネルギー、k-温度、k-圧力という量を導く。接頭辞 k はモデル内の異なる幾何学的セクターを区別するもので、別の物質や宇宙時代を意味しない。これらの第一法則は通常の熱力学と同じ収支関係の形をもち、エネルギー変化は温度 × エントロピー変化から圧力 × 体積変化を引いたものに関係する。

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

次に論文は、膨張する Friedmann 宇宙を使ってこれらの量を評価する。大スケールで一様・等方な標準的理想宇宙だ。低エネルギー・小曲率領域では、物質優勢・放射優勢の例で局所エントロピー密度とエネルギー密度は低下するが、膨張によって体積が十分増えるため総エントロピーは増加する。総エネルギーは先頭次数で一定値へ近づく。ここで先頭次数とは、大時間で支配的な項だけを残し、より速く消える項を落とした近似である。

これは明快な数学的結果だ。同時に境界も重要である。計算は**一つの提案理論の内部**で行われ、具体例に使う Friedmann 宇宙は完全な GfE 方程式の厳密解ではなく、**近似解**にすぎない。完全な運動方程式は提案された GfE 作用を変分して得られ、通常の Friedmann 方程式にない動的 G-field と高次幾何セクターを含む。論文は、エントロピーが重力を生むことを観測したわけでも、私たちの宇宙のダークエネルギーを同定したわけでも、量子重力理論を完成したわけでもない。

Gravity From Entropy が仮定すること

一般相対論は重力を時空の幾何で記述する。物質が時空の曲がり方を決め、その曲率が物質の動き方を決める。GfE は別の提案作用から出発する。計量に関連する対象を量子演算子として扱い、**Geometric Quantum Relative Entropy**（GQRE、幾何学的量子相対エントロピー）から Lagrangian を作る。

120 秒で分かる 3 用語

量子演算子は量子状態に作用し、物理量や変換を表す数学的な規則だ。GfE は計量関連対象をこのように扱えると仮定する。この記事ではその構成を読者が再現する必要はない。
Lagrangian は理論の力学をコンパクトに記述する数学的レシピだ。時空上で積分すると作用が得られ、その作用を変分して場の方程式を導く。
GQRE は GfE が選んだモデル固有の Lagrangian である。量子相対エントロピーの考えを、物理計量と、物質・曲率によって誘導される高次計量の比較へ適用する。「エントロピー」と呼ばれても、普通の熱エントロピーではない。

相対エントロピーは通常、2 つの確率分布または量子状態がどれほど区別できるかの尺度だ。GfE では、物理計量と、物質・曲率によって誘導される高次計量を比較する。「高次」とは余分な時空次元を意味しない。モデルがスカラー、ベクトル型、双ベクトル型の幾何セクターを一つの拡大対象にまとめているという意味だ。動的な **G-field** がこれらの成分を結び、重力側と物質側の両方で使う計量を実効的に修飾する。この枠組みは、低エネルギー・小曲率極限で、作用が一般相対論の Einstein-Hilbert 作用と物質作用の和へ還元するよう構成されている。

この点は過大解釈しやすい。ある極限で Einstein 方程式を回復することは、提案理論に必要な整合性目標だ。それだけで、その極限の外でも自然界がより大きな理論に従うとは示さない。

GfE の場の方程式には、この枠組みが**創発的な有効ダークエネルギー項**と呼ぶ動的項も含まれる。この論文で Bianconi はモデルの内部エネルギー密度をその項と同一視する。「有効ダークエネルギー」とは方程式内での役割を表す言葉であり、宇宙観測から推定されるダークエネルギーと経験的に同一視したわけではない。

「エントロピー」という言葉の 3 つの使い方

通常の熱力学的エントロピーは、ある巨視的状態を作る微視的配置の数に関係する。**量子相対エントロピー**は 2 つの量子状態の区別しやすさを測る。この論文の **GQRE** は、相対エントロピーに着想を得て重力 Lagrangian として使う、モデル固有の幾何学的構成だ。名前が似ていても同じ量ではない。論文は GfE 内部で必要なつながりを導出している。

モデル内部での厳密な熱力学結果

論文はまず GfE 枠組みそのものの水準で議論する。k で指標付けされる各次数・各種の幾何自由度について、次を定義する。

- GQRE から得る局所 k-エントロピー
- モデルの内部エネルギー密度から得る局所 k-エネルギー
- 共役な k-温度
- k-圧力

これらは局所的第一法則を満たす。論文の記法では、

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

指標 k は、異なる物質や宇宙時代の一覧ではない。一様・等方計算では 5 項を表す。1 つのスカラー項、ベクトル型セクターの時間的・空間的な別項、双ベクトル型セクターの時間–空間・空間–空間の別項だ。スカラーには方向指標がなく、ベクトル型項は時間方向と空間方向を区別し、双ベクトルは方向の組から作られる。各セクターは独自の温度と圧力をもちうる。対応する G-field 成分によって、k-温度は正にも負にもなりうる。

これは宇宙論的地平線の近くへ温度計を置いて測る温度ではない。標準的な de Sitter 時空の量子場温度は H に比例する。**Gibbons-Hawking 温度**は宇宙論的地平線へ割り当てられ、**Bunch-Davies 真空**は標準的な de Sitter 不変量子状態で、その場の相関が対応する熱応答を与える。論文は両者と、de Sitter 例で H^2 に比例する幾何学的 k-温度を明確に区別する。ここで「温度」とは、モデルのエントロピー・エネルギー定義から導かれる熱力学的共役変数の名称だ。

したがって第一法則の恒等式はきちんと導かれたものだが、**GfE という枠組みの内部で成り立つ結果**である。GfE 作用と定義を受け入れれば、この熱力学構造が従う。

Friedmann 計算が近似である理由

形式論を宇宙論例へ変えるため、論文は一様・等方な Friedmann-Robertson-Walker（FRW）時空を使う。「一様」とは大スケールで平均的性質がどこでも同じ、「等方」とはどの方向を見ても同じという意味だ。1 つのスケール因子で距離の時間発展を表し、物質を滑らかな完全流体として表し、Hubble パラメータ H で膨張率をまとめる。個々の銀河を描く地図ではなく、理想化背景である。

しかし構造上の不一致がある。Friedmann 宇宙は Einstein 方程式を解く。一般には、スカラー、ベクトル型、双ベクトル型セクターや G-field の微分まで追う完全な高次 GfE 方程式の解ではない。Einstein 方程式が再現されるのは、提案理論の一次・低エネルギー・小曲率極限だけだ。

論文はこれを直接述べ、Friedmann 解を近似として扱う。その方法は、より完全な理論に平均場解を入れて近似がどこまで信頼できるかを見ることになぞらえられている。必要な領域は低エネルギー・小曲率で、$l_P H \ll 1$ とまとめられる。ここで l_P は Planck 長。さらに、誘導された高次計量と物理的高次計量の逆行列との積が正定値のままであるという条件も必要だ。

したがって結果は「GfE が私たちの宇宙史を予測した」ではない。むしろ、**GfE 宇宙が馴染みの Friedmann 宇宙論で十分よく近似できるなら、完全な GfE 量はこのような熱力学スケーリングを生む**、というものに近い。

局所量と総量の違い

その領域では、主要な局所量は単純なスケーリングをもつ。

- モデルのエントロピー密度はH^2 に比例
- モデルのエネルギー密度はH^4 に比例
- de Sitter 以外の晩期 Friedmann 例では、おおよそt^{-2} とt^{-4} になる

したがって宇宙が膨張すると両密度とも下がる。しかし密度は総量ではない。

論文が膨張する時空領域全体で積分すると、増大する体積が答えを変える。物理的に馴染みのある物質優勢・放射優勢の例では、単位体積当たりのエントロピーが減っても総エントロピーは時間とともに増える。総エネルギーは増え続けず、先頭次数では一定値へ近づく。

これは論文で最も有用な概念結果だ。局所的な秩序化や希薄化は、大域的第二法則と自動的に矛盾しない。時空体積の増え方の方が速ければ、単位体積当たりのエントロピーが減りながら、積分したエントロピーは増えうる。

この計算は、実在宇宙の熱力学的時間の矢を正しく微視的に説明したと証明するものではない。提案枠組みが Friedmann 近似の中で、局所–大域の分離を矛盾なく扱えることを示す。

de Sitter との比較 —— ただし温度は別物

論文は de Sitter 時空も考える。H が一定の、理想化された指数関数的膨張時空だ。単一観測者については有限な**因果ダイヤモンド**だけで積分する。これは、より早い出来事の未来光円錐と、より遅い出来事の過去光円錐が重なる領域で、その間に観測へ関与できる時空範囲を区切る。このダイヤモンド上で総 GfE エントロピーはH^{-2} に比例し、馴染みの Gibbons-Hawking エントロピーと同じ H 依存をもつ。総 GfE エネルギーは、モデルの単位系で 1 のオーダー程度になる。

> **一つの宇宙論背景ファミリー**
>
> FRW は一様・等方な幾何のファミリーであり、別の「場所」ではない。物質優勢宇宙と放射優勢宇宙は、何がモデルを満たすかによって区別される FRW のケースだ。de Sitter 時空も FRW 形式で書けるが、H 一定・指数膨張する真空優勢ケースを表す。因果ダイヤモンドはその時空内で一人の観測者について選ぶ有限領域で、別種の宇宙ではない。

スケーリングが一致しても、同じ物理対象を導出したことにはならない。対応する GfE の k-温度はH^2 に比例し、H に比例する標準 de Sitter 温度とは異なる。論文は、この違いを k-温度が背景上に住む量子場ではなく、時空幾何に属する証拠と解釈する。

さらに、そのような温度が通常の粒子放出ではなく重力子放射と関連する可能性を示唆する。しかしこれは将来の問いで、今回の結果ではない。そもそも温度が放射に対応するか確立するには、まず理論を量子化する必要がある。

この研究からは言えないこと

- 重力がエントロピーから創発することを**観測的に示していない**。
- モデルの有効項が宇宙論で測定されるダークエネルギーだと**確立していない**。
- 一般相対論を、検証済みでより優れた理論に置き換えたわけでは**ない**。一般相対論はここでは提案理論の低エネルギー・小曲率極限として現れる。
- Friedmann 宇宙を GfE の厳密解にしたわけでは**ない**。モデルの熱力学的挙動を見積もるために使う近似である。
- 時空自由度の完全な微視的計数を導出して**いない**。
- 完成した量子重力理論を与えたり、重力子を検出したりして**いない**。
- 負の k-温度が通常の温度計で読む「負温度」だとは**示していない**。

結果をどう評価するか

これは査読済み理論論文なので、「証拠」の意味は実験とは異なる。適切な問いは、定義が整合しているか、導出が従うか、近似が明記され制御されているかだ。

その水準では、論文は GfE に具体的な熱力学辞書を与え、単なる類推に頼らず第一法則構造を導いている。また近似境界をかなり明示的にしている。Friedmann 解は一般相対論から借り、GfE 量へ代入し、誘導計量が良好に振る舞う領域へ限定する。

より大きな物理主張は未解決だ。枠組みは新しく、この論文は宇宙論をデータと比較しない。量子化、接触幾何学的力学、重力子放射の可能性といった特に興味深い含意の一部も、将来研究として提示される。内部整合性は新しい重力理論に必要だが、自然を記述することを示すには十分ではない。

なぜ重要なのか

重力と熱力学の関係は、ブラックホールエントロピーから de Sitter 空間の温度まで、古く深い。そうした結果の多くは地平線を中心に整理される。GfE は代わりに、物質と幾何の関係から局所的・体積的な情報量を直接作ろうとする。

この提案が生き残るかは未解決だ。しかし熱力学的演習は、この種の理論が満たすべき有用な標的を露わにする。膨張宇宙で局所構造や局所エントロピー密度の低下が、総エントロピー増加とどう共存できるかを説明しなければならない。

この論文は、それが起こりうる一つの数学的に明示された方法を示す。価値は重力–エントロピー問題を閉じたことではない。その問題の一部を、仮定、限界、次の検証を明確に述べられる方程式へ変えたことにある。

要点

Bianconi は、幾何学的量子相対エントロピーに基づく提案修正重力枠組み Gravity From Entropy の内部で熱力学的記述を導出した。モデルの局所エントロピー、エネルギー、温度、圧力変数は第一法則を満たす。完全な GfE 量を低エネルギー・小曲率の Friedmann 近似上で評価すると、宇宙膨張につれて局所エントロピー密度とエネルギー密度は低下するが、時空体積が増えるため総エントロピーは増え、物質優勢・放射優勢の例では総エネルギーは先頭次数で一定へ近づく。de Sitter の因果ダイヤモンドではエントロピーが H^{-2} に比例するが、モデル温度は標準的地平線温度とは異なる。これらは GfE 内部の条件付き数学的結果であり、重力がエントロピーから来るという観測証拠でも、ダークエネルギー測定でも、完成した量子重力理論でもない。

出典

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