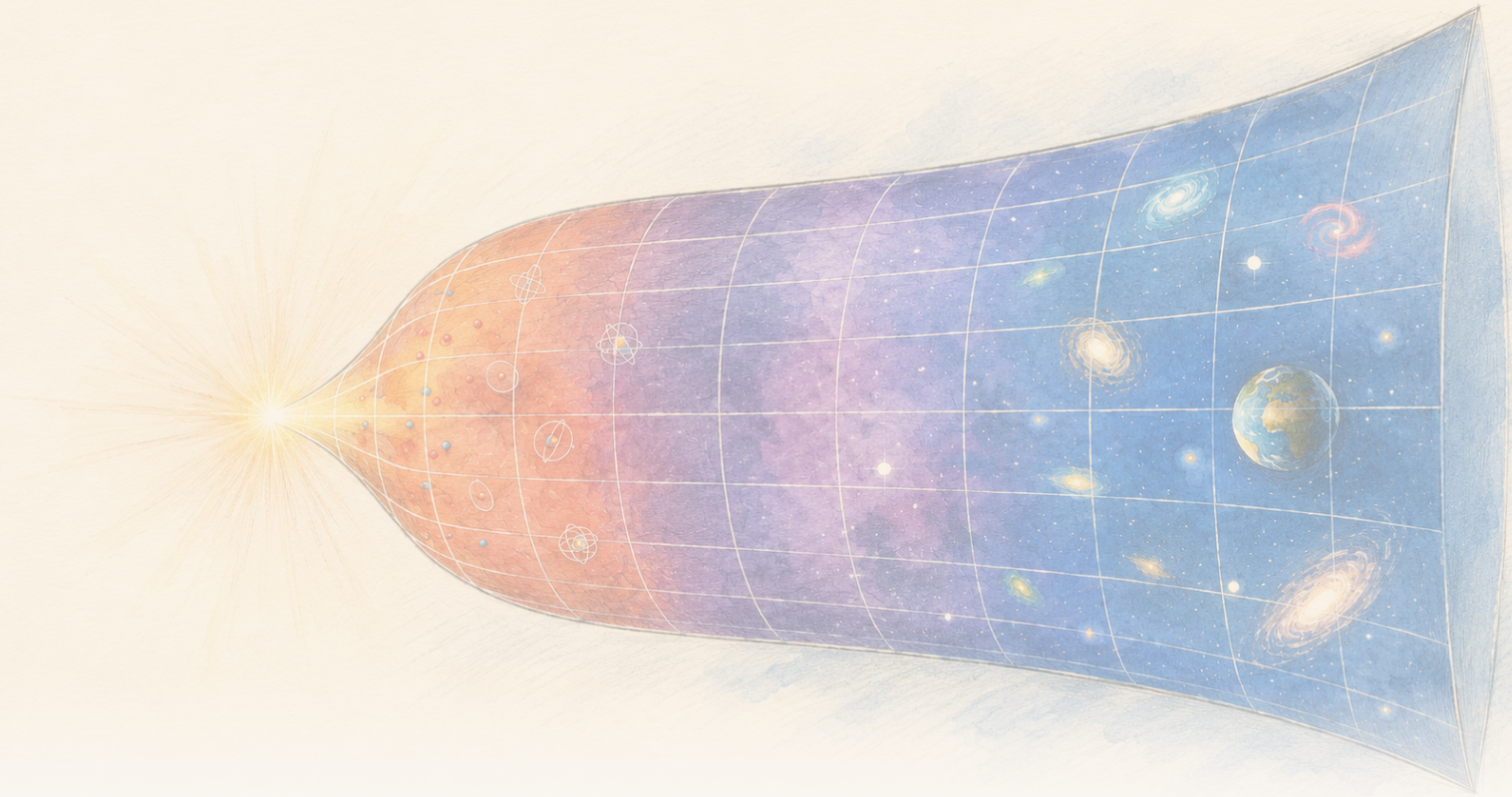

The Clean Paper

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

在一種基於熵的重力模型中，局部熵密度下降，但總熵仍會增長

一篇發表於 *Physical Review D* 的論文，在 *Gravity From Entropy* 這一擬議的修正重力框架內部推導出溫度、壓強和第一定律。在晚期、低曲率的弗里德曼近似中，模型的局部熵密度和能量密度隨膨脹下降，但體積增長使總熵上升。計算本身具體而明確，卻帶有重要前提：弗里德曼宇宙並不是完整理論的精確解；這也不是「重力源於熵」的觀測證據，不是對已測暗能量的解釋，更不是一套完成的量子重力理論。

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

體積變大時，密度可以下降，而總量仍然上升

如果這個模型中的熵密度會隨著宇宙膨脹而下降，為什麼總熵還能增加？

可以把一個膨脹的宇宙想像成被分成許多很小的格子。每個格子裡某種量可以減少，但隨著整個區域不斷變大，把所有格子加起來後的總量仍可能增加。當體積本身在變化時，「密度下降」和「總量上升」並不矛盾。

這個樸素的記賬問題，是一篇雄心更大的理論論文的核心。在 Physical Review D 上，數學物理學家 Ginestra Bianconi 為 **Gravity From Entropy**（GfE）建立了一套熱力學描述。GfE 是一種近期提出的模型，其中重力透過物質與幾何之間的資訊理論關係來編碼。這裡的「資訊理論」指的是：模型從一種數學量出發，用它衡量兩種幾何描述之間的差異——一種是真實的物理幾何，另一種由物質和曲率誘導出來。

論文推導出一組局部量，稱為 k-熵、k-能量、k-溫度和 k-壓強。前綴 k 用來區分模型中的不同幾何扇區；它們不是不同物質，也不是不同宇宙時代。它們之間的第一定律關係，與熱力學有相同的記賬形式：能量的變化等於溫度乘以熵的變化，再減去壓強乘以體積的變化。

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

隨後，論文把這些量放到膨脹的弗里德曼宇宙學背景中計算。弗里德曼宇宙是一類標準化的理想模型，在大尺度上均勻且各向同性。在低能、低曲率條件下，以物質或輻射為主的例子中，局部熵密度和能量密度都會下降，但膨脹帶來的體積增長足以讓總熵增加。總能量在主導階近似下趨於一個常數；這裡的「主導階」是指只保留大時間尺度上最主要的項，而忽略隨時間增長更快衰減的項。

這是一個清楚的數學結果，它的邊界也同樣重要：計算發生在**一個擬議的理論內部**，而用於具體示例的弗里德曼宇宙只是完整 GfE 方程的**近似解**，不是精確解。GfE 的運動方程來自對所提出的作用量做變分，其中包含動力學 G 場和普通弗里德曼方程沒有的高階幾何扇區。論文沒有觀測到「熵產生重力」，沒有識別出我們宇宙中實測的暗能量，也沒有完成一套量子重力理論。

Gravity From Entropy 假設了什麼

廣義相對論用時空幾何描述重力。物質決定時空如何彎曲，而曲率又決定物質如何運動。GfE 從另一種擬議的作用量出發：它把與度規有關的對象視為量子算符，並用一種**幾何量子相對熵**（Geometric Quantum Relative Entropy，GQRE）構造其拉格朗日量。

> **120 秒理解三個術語**
>
> **量子算符**是一種作用於量子態的數學規則，用來表示某個物理量或變換。GfE 假設與度規有關的對象可以這樣處理；本文不要求讀者重建這一數學構造。
> **拉格朗日量**是一套緊湊描述理論動力學的數學規則。把它在時空上積分得到作用量，再對作用量做變分，就可以推導場方程。

> **GQRE** 是 GfE 選定的、模型特有的拉格朗日量。它借用了量子相對熵的思想，用來比較物理度規和由物質與曲率誘導出的高階度規。名字裡有「熵」，並不意味著它就是普通的熱力學熵。

相對熵通常用來衡量兩個機率分布或量子態有多容易區分。在 GfE 中，被比較的是物理度規，以及由物質和曲率誘導出的高階度規。這裡的「高階」並不意味著額外的時空維度，而是模型把純量、向量型和雙向量型幾何扇區組合進一個擴大的對象中。一個動力學 **G 場**把這些部分聯繫起來，並「修飾」模型中重力部分和物質部分所使用的度規。該框架被構造成：在低能和低曲率極限下，它的作用量會還原為廣義相對論的愛因斯坦–希爾伯特作用量再加上物質作用量。

最後這句話很容易被讀得過頭。在某個極限下恢復愛因斯坦方程，是這項理論提案需要滿足的一致性目標；它並不能證明自然界在該極限之外也使用這套更大的理論。

GfE 的場方程還包含一個動力學項，框架把它稱為**湧現的有效暗能量項**。在這篇論文裡，Bianconi 把模型的內能密度與這個項對應起來。「有效暗能量」描述的是它在方程裡的作用，並不意味著它已經在經驗上被識別為宇宙學觀測所推斷出的暗能量。

> **「熵」這個詞在這裡有三種不同用法**
>
> **普通熱力學熵**描述有多少種微觀排列能夠產生同一個宏觀狀態。**量子相對熵**衡量兩個量子態有多容易區分。本文中的 **GQRE** 則是一種受相對熵啟發、專門為該模型構造的幾何量，並被用作重力拉格朗日量。名字相似，並不意味著這些量可以互換；論文只是在 GfE 內部推導出它所使用的聯繫。

模型內部的精確熱力學結果

論文首先直接在 GfE 框架層面工作。對每一個由 k 標記的幾何自由度階數和類型，它定義：

- 從 GQRE 得到的局部 k-熵；
- 從模型內能密度得到的局部 k-能量；
- 與其共軛的 k-溫度；
- 以及 k-壓強。

這些量滿足一個局部第一定律。按論文的記號，

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

指標 k 不是不同物質或宇宙時代的列表。在均勻、各向同性的計算中，它標記 5 個條目：一個純量條目；向量型扇區中分開的類時和類空條目；以及雙向量型扇區中分開的時–空和空–空條目。純量沒有方向指標；向量型條目區分時間方向和空間方向；雙向量則由成對方向構成。每個扇區都可以有自己的溫度和壓強。根據相應的 G 場分量，k-溫度也可以為正或為負。

這些並不是把溫度計放在宇宙學視界附近就能測到的溫度。標準德西特量子場論中的溫度與 H 成正

比：**吉本斯–霍金溫度**對應宇宙學視界，而 **邦奇–戴維斯真空**是標準的德西特不變數子態，其場關聯會產生相應的熱響應。論文明確把這兩者與自己的幾何 k-溫度區分開；在德西特例子中，後者與 H^2 成正比。這裡「溫度」指的是由模型中的熵和能量定義推導出來的熱力學共軛變數。

因此，第一定律恆等式確實是一個推導結果，但它是一個**內部結果**：接受 GfE 的作用量和定義，這套熱力學結構隨之成立。

為什麼弗里德曼計算只是近似

為了把形式體系放進一個具體宇宙學例子，論文使用均勻、各向同性的弗里德曼–羅伯遜–沃爾克（FRW）時空。「均勻」表示大尺度模型在每個位置具有相同的平均性質；「各向同性」表示從各個方向看都一樣。一個尺度因子描述距離怎樣隨時間增長，物質被近似為平滑的理想流體，而哈伯參數 H 概括膨脹速率。這是理想化背景，不是逐個星系的地圖。

但這裡存在一個結構上的不匹配。弗里德曼宇宙解的是愛因斯坦方程；一般來說，它們並不滿足完整的高階 GfE 方程。完整方程還追蹤純量、向量型和雙向量型扇區，以及 G 場的導數。只有在這項提案的一階、低能、低曲率極限下，愛因斯坦方程才重新出現。

論文直接說明瞭這一點，並把弗里德曼解作為近似使用。作者把這種做法類比於：把一個平均場解代入更完整的理論，看看這個近似在哪些範圍內仍然可靠。所需條件包括低能和低曲率，可以概括為 $l_P H \ll 1$，其中 l_P 是普朗克長度。第二個條件要求：誘導出的高階度規與物理高階度規逆矩陣的乘積保持正定。

所以結果並不是「GfE 預測了我們宇宙的歷史」。更準確的說法是：**如果一個 GfE 宇宙可以被熟悉的弗里德曼宇宙學充分近似，那麼完整 GfE 量在這個近似背景下會呈現出這些熱力學標度**。

局部量與總量的結果

在這一條件範圍內，主導的局部量具有簡單標度：

- 模型熵密度與 H^2 成正比；
- 模型能量密度與 H^4 成正比；
- 對晚期、非德西特的弗里德曼例子，這兩者近似變為 t^{-2} 和 t^{-4}。

因此，隨著宇宙膨脹，兩種密度都會下降。但密度並不等於總量。

論文對膨脹的時空區域做積分後，增長的體積改變了答案。在我們比較熟悉的物質主導和輻射主導例子中，即使單位體積的熵下降，總熵仍隨時間增加。總能量則不會持續增長；在主導階近似下，它趨於常數。

這是論文最有用的概念性結果。局部更有序，或局部熵密度因稀釋而下降，並不自動與整體第二定律衝突。一個區域的單位體積熵可以越來越低，而積分後的總熵仍然增加，因為時空體積增長得更快。

這項計算並沒有證明這就是現實宇宙中熱力學時間箭頭的正確微觀解釋。它只說明，在弗里德曼近似下，這個擬議框架可以無矛盾地容納「局部下降、整體上升」的分離。

與德西特的比較：溫度並不相同

論文還考慮了德西特空間——一種理想化、指數膨脹且 H 恆定的時空。對於單個觀察者，它只在一個有限的**因果鑽石（causal diamond）**內積分：這是較早事件的未來光錐與較晚事件的過去光錐重疊的區域，限定了兩者之間能夠參與觀測的時空範圍。在這個因果鑽石內，GfE 總熵與 H^{-2} 成正比，與熟悉的吉本斯–霍金熵具有相同的 H 標度。GfE 的總能量在模型單位下為 1 的量級。

> **同一類宇宙學背景**
>
> FRW 是一整類均勻、各向同性的幾何，不是另一個「地方」。物質主導和輻射主導宇宙都是 FRW 的具體情況，區別在於模型中主要填充的成分。德西特空間也可以寫成 FRW 形式，但它代表的是 H 恆定、指數膨脹的真空主導情況。因果鑽石只是從該時空中為單個觀察者選出的一個有限區域，並不是另一種宇宙。

標度相同，並不等於推導出了同一個物理對象。與之對應的 GfE k-溫度與 H^2 成正比，而標準德西特溫度與 H 成正比。論文把這一差異解釋為：k-溫度屬於時空幾何，而不是生活在該背景上的量子場。

論文進一步提出，這種溫度可能與重力子輻射有關，而不是普通粒子發射。這是未來研究問題，不是本文結果。理論首先需要被量子化，才能判斷它的溫度究竟是否對應任何輻射。

這項工作不能證明什麼

- 它**沒有**通過觀測證明重力由熵湧現。
- 它**沒有**確立模型中的有效項就是宇宙學觀測測得的暗能量。
- 它**沒有**用一套已經驗證、更加優越的理論取代廣義相對論。廣義相對論在這裡作為提案的低能、低曲率極限出現。
- 它**沒有**讓弗里德曼宇宙成為 GfE 的精確解。它們只是估算模型熱力學行為時採用的近似。
- 它**沒有**推導出完整的時空微觀自由度計數。
- 它**沒有**給出一套完成的量子重力理論，也沒有偵測到重力子。
- 它**沒有**說明負的 k-溫度就是普通溫度計上的負溫讀數。

這個結果有多強？

這是一篇經過同儕審查的理論論文，所以這裡的「證據」和實驗中的含義不同。更合適的問題是：定義是否自洽？推導是否成立？近似條件是否被明確說明並受到控制？

在這個層面上，論文為 GfE 提供了一套具體的熱力學「詞典」，並真正推導出第一定律結構，而不是只做類比。它也把近似邊界寫得非常清楚：弗里德曼解借自廣義相對論，被代入 GfE 的量中，而且只在誘導度規保持良好性質的範圍內使用。

更大的物理主張仍然開放。這個框架提出時間不長；本文沒有拿它的宇宙學與資料比較；而若干最有意思的含義——量子化、接觸幾何動力學，以及可能的重力子輻射——都只是未來研究方向。對於一套新的重力理論，內部一致性是必要條件，但不足以說明它描述了自然界。

為什麼它值得關注

重力與熱力學之間的聯繫既古老又深刻，從黑洞熵到德西特空間的溫度，許多結果都圍繞「視界」組織。GfE 則嘗試從物質與幾何之間的關係出發，直接構造一個局部、體積性的幾何資訊量。

這項提案最終能否成立仍是開放問題。但這次熱力學推導暴露出一個對任何類似理論都有用的目標：它應該解釋，在膨脹的宇宙中，局部結構和下降的局部熵密度如何與增長的總熵共存。

這篇論文給出了一個數學上明確的實現方式。它的價值不在於結束了「重力—熵」問題，而在於把其中一部分問題變成了方程，使它的假設、限制和下一步檢驗都可以清楚地說出來。

重點摘要

Bianconi 在 Gravity From Entropy 內部推導出一套熱力學描述。GfE 是一個以幾何量子相對熵為基礎的擬議修正重力框架。模型中的局部熵、能量、溫度和壓力變數滿足第一定律。把完整 GfE 量放到低能、低曲率的弗里德曼近似背景上計算時，隨著宇宙膨脹，局部熵密度和能量密度下降；但由於時空體積增長，總熵上升。對於物質主導和輻射主導的例子，總能量在主導階近似下趨於常數。德西特因果鑽石給出與 H^{-2} 成正比的熵標度，但模型溫度與標準視界溫度不同。這些都是 GfE 內部、帶前提的數學結果，不是「重力來自熵」的觀測證據，不是暗能量測量，也不是一套完成的量子重力理論。

來源

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