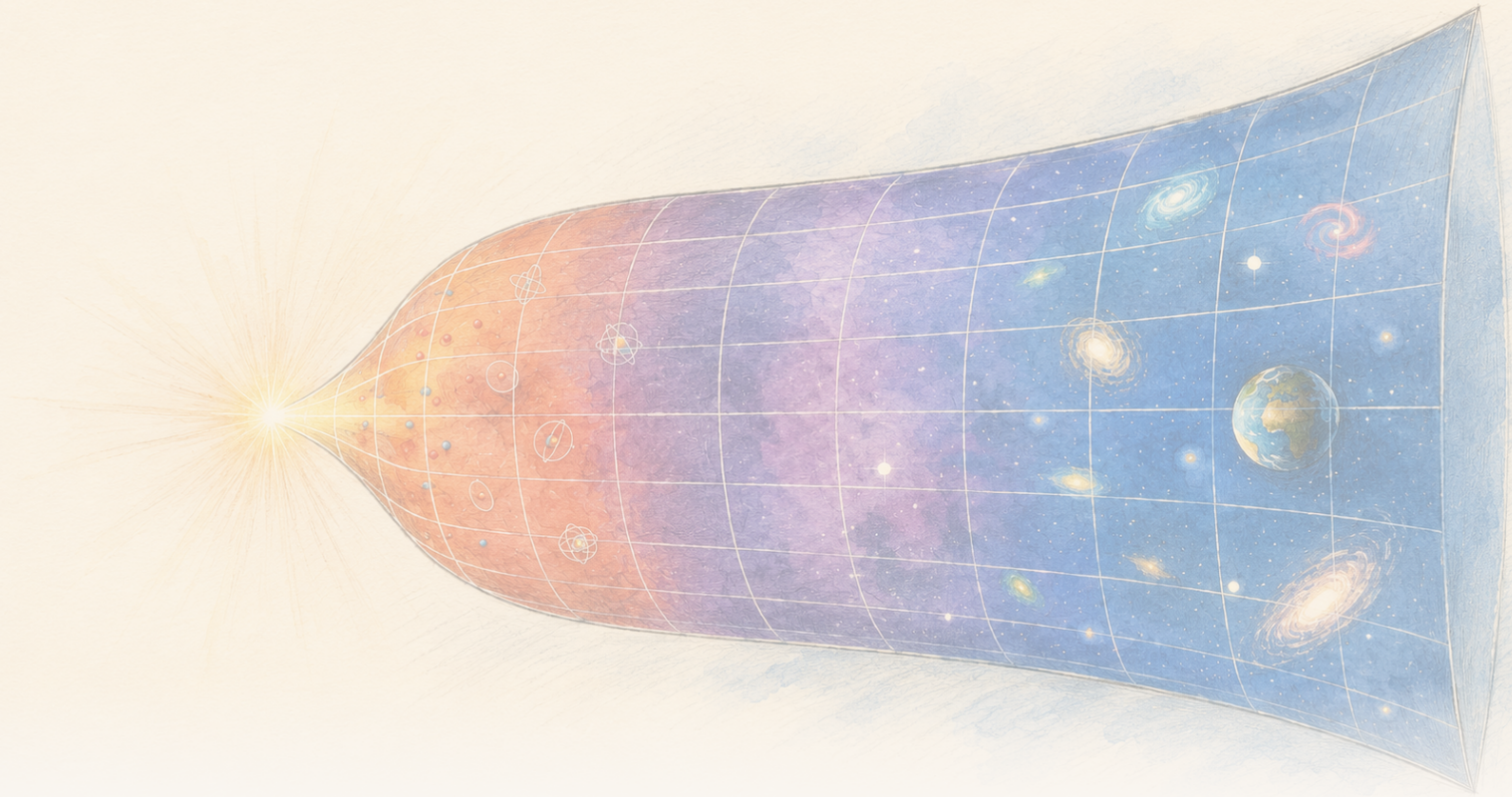

The Clean Paper

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

V modelu gravitace založeném na entropii klesá lokální hustota entropie, zatímco celkové množství roste

Článek v Physical Review D odvozuje teploty, tlaky a první zákon uvnitř Gravity From Entropy, navrženého rámce modifikované gravitace. V pozdní nízkoenergetické Friedmannově aproximaci s malým zakřivením klesají lokální hustoty entropie a energie modelu, zatímco rozpínání zvyšuje celkovou entropii. Výpočet je vnitřně konkrétní, ale podmíněný: Friedmannovy kosmologie nejsou přesnými řešeními úplné teorie a nejde o pozorovací důkaz, že gravitace pochází z entropie, vysvětlení měřené temné energie ani dokončenou teorii kvantové gravitace.

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

Rostoucí objem může snižovat hustotu a současně zvyšovat celkové množství

Jestliže v tomto modelu při rozpínání vesmíru klesá hustota entropie, jak může jeho celková entropie přesto růst?

Představte si rozpínající se vesmír rozdělený na drobné buňky. Množství něčeho v každé buňce může klesat, i když celkové množství v celé rostoucí oblasti stoupá. Pokles hustoty a růst celku nejsou protiklady, pokud se mění samotný objem.

Tato jednoduchá otázka bilance stojí v centru mnohem ambicióznější teoretické práce. V článku v Physical Review D rozvíjí matematická fyzička Ginestra Bianconi termodynamický popis modelu **Gravity From Entropy** (GfE), nedávno navrženého rámce, v němž je gravitace zakódována informačně-teoretickým vztahem mezi hmotou a geometrií. „Informačně-teoretický“ zde znamená, že model vychází z matematické míry rozdílu mezi dvěma popisy geometrie: fyzickou geometrií a geometrií vyvolanou hmotou a zakřivením.

Článek odvozuje lokální veličiny nazývané k-entropie, k-energie, k-teploty a k-tlaky. Předpona k rozlišuje různé geometrické sektory modelu; nejde o různé látky ani kosmické epochy. Jejich vztah prvního zákona má stejnou bilanční podobu jako v termodynamice: změna energie souvisí s teplotou krát změna entropie minus tlak krát změna objemu.

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

Článek pak tyto veličiny vyhodnocuje v rozpínajících se Friedmannových kosmologiích: standardních idealizovaných vesmírech, které jsou ve velkých měřítkách homogenní a izotropní. V režimu nízkých energií a malého zakřivení klesají v příkladech ovládaných hmotou a zářením lokální hustoty entropie i energie, ale rozpínání dodává dostatek objemu, aby celková entropie rostla. Celková energie se v hlavním řádu blíží konstantě, tedy po ponechání dominantního členu pro velké časy a zanedbání členů, které s časem mizí rychleji.

Jde o čistě matematický výsledek. Stejně důležitá je jeho hranice: výpočet probíhá **uvnitř jedné navržené teorie** a Friedmannovy kosmologie použité pro konkrétní příklady jsou pouze **přibližnými**, nikoli přesnými řešeními úplných rovnic GfE. Tyto pohybové rovnice vznikají variací navržené akce GfE a zahrnují dynamické G-pole a geometrické sektory vyššího řádu, které v běžných Friedmannových rovnicích chybějí. Článek nepozoruje, že by entropie vytvářela gravitaci, neurčuje temnou energii našeho vesmíru ani nedokončuje teorii kvantové gravitace.

Co Gravity From Entropy předpokládá

Obecná relativita popisuje gravitaci geometrií prostoročasu. Hmota říká prostoročasu, jak se má zakřivit, a toto zakřivení říká hmotě, jak se má pohybovat. GfE začíná jinou navrženou akcí: zachází s objekty souvisejícími s metrikou jako s kvantovými operátory a svůj lagrangián staví z **geometrické**

kvantové relativní entropie (GQRE).

> **Tři pojmy za 120 sekund**
>
> **Kvantový operátor** je matematické pravidlo, které působí na kvantový stav a představuje určitou veličinu nebo transformaci. GfE předpokládá, že lze tímto způsobem zacházet s objekty souvisejícími s metrikou; článek po čtenáři nepožaduje, aby tuto konstrukci reprodukoval.
> **Lagrangián** je kompaktní matematický předpis pro dynamiku teorie. Integrací přes prostoročas získáme akci a její variací odvodíme rovnice pole.
> **GQRE** je modelově specifický lagrangián zvolený v GfE. Přizpůsobuje myšlenku kvantové relativní entropie k porovnání fyzické metriky s metrikou vyššího řádu vyvolanou hmotou a zakřivením. To, že se nazývá entropií, z ní nedělá běžnou tepelnou entropii.

Relativní entropie je obvykle mírou rozlišitelnosti dvou pravděpodobnostních rozdělení nebo kvantových stavů. V GfE se porovnává fyzická metrika s metrikou vyššího řádu vyvolanou hmotou a zakřivením. „Vyšší řád“ neznamená další rozměry prostoročasu. Znamená, že model sdružuje skalární, vektorové a bivektorové geometrické sektory do jednoho rozšířeného objektu. Dynamické **G-pole** tyto složky propojuje a „obléká“ metriku používanou v gravitační i hmotové části modelu. Rámec je sestaven tak, aby se jeho akce v limitě nízkých energií a malého zakřivení redukovala na Einsteinovu-Hilbertovu akci obecné relativity plus akci hmoty.

Poslední větu lze snadno přecenit. Obnovení Einsteinových rovnic v určité limitě je cílem konzistence návrhu. Neukazuje, že příroda používá širší teorii mimo tento limitní režim.

Rovnice pole GfE obsahují také dynamický člen, který rámec nazývá **emergentním efektivním členem temné energie**. Bianconi v tomto článku ztotožňuje hustotu vnitřní energie modelu s tímto členem. „Efektivní temná energie“ popisuje jeho úlohu v rovnicích. Nejde o empirické ztotožnění s temnou energií odvozenou z kosmologických pozorování.

> **Tři různé významy slova „entropie“**
>
> **Běžná termodynamická entropie** vyjadřuje, kolik mikroskopických uspořádání může vytvářet daný makroskopický stav. **Kvantová relativní entropie** měří, jak dobře lze rozlišit dva kvantové stavy. **GQRE** je v tomto článku modelově specifická geometrická konstrukce inspirovaná relativní entropií a používaná jako gravitační lagrangián. Podobné názvy z těchto veličin nedělají zaměnitelné pojmy; článek odvozuje spojení, která používá uvnitř GfE.

Přesný termodynamický výsledek uvnitř modelu

Článek nejprve pracuje na úrovni samotného rámce GfE. Pro každý řád a typ geometrického stupně volnosti indexovaného pomocí k definuje:

- lokální k-entropii z GQRE;

- lokální k-energii z hustoty vnitřní energie modelu;
- sdruženou k-teplotu;
- a k-tlak.

Tyto veličiny splňují lokální první zákon. V zápisu článku:

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

Index k není seznamem různých látek nebo epoch vesmíru. V homogenním a izotropním výpočtu označuje pět položek: jednu skalární; oddělenou časupodobnou a prostorupodobnou položku vektorového sektoru; a oddělenou časoprostorovou a prostoroprostorovou položku bivektorového sektoru. Skalár nemá směrový index, vektorové položky rozlišují časové a prostorové směry a bivektor je vytvořen z dvojic směrů. Každý sektor může nést vlastní teplotu a tlak. K-teplota může být kladná nebo záporná podle odpovídající složky G-pole.

Nejde o teploty měřené teploměrem poblíž kosmologického horizontu. Standardní kvantově-polní teplota de Sitterova prostoru škáluje jako H: **Gibbonsova-Hawkingova teplota** se přiřazuje kosmologickému horizontu, zatímco **Bunchovo-Daviesovo vakuum** je standardní kvantový stav invariantní vůči symetriím de Sitterova prostoru, jehož korelace pole dávají související tepelnou odezvu. Článek obě výslovně odlišuje od svých geometrických k-teplot, které v de Sitterově příkladu škálují jako H^2. „Teplota“ zde označuje termodynamicky sdruženou veličinu odvozenou z definic entropie a energie modelu.

Identita prvního zákona je tedy skutečně odvozena, ale jde o **výsledek podmíněný předpoklady modelu**: přijmete-li akci a definice GfE, tato termodynamická struktura z nich plyne.

Proč je Friedmannův výpočet aproximací

Aby formalismus převedl do kosmologického příkladu, používá článek homogenní a izotropní Friedmannovy-Robertsonovy-Walkerovy (FRW) prostoročasy. „Homogenní“ znamená, že má velkoškálový model stejné průměrné vlastnosti na každém místě; „izotropní“ znamená, že vypadá stejně ve všech směrech. Jediný škálový faktor popisuje, jak vzdálenosti s časem rostou, hmota je reprezentována jako hladká dokonalá tekutina a Hubbleův parametr H shrnuje rychlost rozpínání. Jde o idealizované pozadí, nikoli mapu jednotlivých galaxií.

Existuje však strukturální nesoulad. Friedmannovy vesmíry řeší Einsteinovy rovnice. Obecně neřeší úplné rovnice GfE vyššího řádu, které sledují také skalární, vektorové a bivektorové sektory a derivace G-pole. Einsteinovy rovnice se znovu objeví pouze v aproximaci prvního řádu při nízkých energiích a malém zakřivení.

Článek to uvádí přímo a s Friedmannovými řešeními zachází jako s aproximacemi — podobně jako když se do úplnější teorie vloží řešení středního pole a zkoumá se, kde ještě zůstává spolehlivé. Režim vyžaduje nízkou energii a malé zakřivení, shrnuté podmínkou $l_P H \ll 1$, kde l_P je Planckova délka. Druhá podmínka požaduje, aby součin indukované metriky vyššího řádu a inverzní fyzické metriky

vyššího řádu zůstal pozitivně definitní.

Závěr tedy není „GfE předpovídá historii našeho vesmíru“. Přesnější formulace zní: **jestliže lze vesmír GfE dostatečně dobře aproximovat známou Friedmannovou kosmologií, pak úplné veličiny GfE vytvářejí následující termodynamická škálování.**

Lokální a celkový výsledek

V tomto režimu mají vedoucí lokální veličiny jednoduchá škálování:

- hustota entropie modelu škáluje jako H^2;
- hustota energie modelu škáluje jako H^4;
- v pozdních časech u nede Sitterových Friedmannových příkladů přecházejí přibližně na t^{-2} a t^{-4}.

Obě hustoty tedy při rozpínání vesmíru klesají. Lokální hustota však není totéž co celkové množství.

Když se veličiny integrují přes rozpínající se oblast prostoročasu, rostoucí objem změní celkový výsledek. V běžných fyzikálních příkladech ovládaných hmotou a zářením celková entropie s časem roste, i když entropie na jednotku objemu klesá. Celková energie neroste bez omezení; v hlavním řádu se blíží konstantě.

To je nejužitečnější koncepční výsledek článku. Lokální uspořádání nebo zředění není automaticky v rozporu s globálním druhým zákonem. Oblast může mít na jednotku objemu lokálně méně entropie, zatímco integrovaná entropie roste, protože objem prostoročasu roste rychleji.

Výpočet nedokazuje, že jde o správné mikroskopické vysvětlení termodynamické šipky času v reálném vesmíru. Ukazuje, že navržený rámec dokáže ve Friedmannově aproximaci bez rozporu rozlišit lokální a globální chování.

Porovnání s de Sitterovým prostorem, ale s jinou teplotou

Článek také zkoumá de Sitterův prostor, idealizovaný exponenciálně se rozpínající prostoročas s konstantním H. Pro jediného pozorovatele integruje pouze přes konečný **kauzální diamant**: průnik budoucího světelného kužele dřívější události a minulého světelného kužele pozdější události, který vymezuje oblast prostoročasu schopnou podílet se na pozorování mezi nimi. V tomto diamantu škáluje celková entropie GfE jako H^{-2}, stejně jako známá Gibbonsova-Hawkingova entropie. Celková energie GfE je v jednotkách modelu řádu jedna.

> **Jedna rodina kosmologických pozadí**

> FRW je rodina homogenních a izotropních geometrií, nikoli další místo. Vesmíry ovládané hmotou a zářením jsou případy FRW rozlišené tím, co model vyplňuje. Také de Sitterův prostor lze zapsat ve tvaru FRW, představuje však případ ovládaný vakuem s konstantním H a exponenciálním rozpínáním. Kauzální diamant je konečná oblast vybraná uvnitř tohoto prostoročasu pro jednoho pozorovatele; nejde o jiný druh vesmíru.

Shoda škálování není totéž jako odvození stejného fyzikálního objektu. Odpovídající k-teplota GfE škáluje jako H^2, na rozdíl od standardní de Sitterovy teploty, která škáluje jako H. Článek tento rozdíl vykládá jako známku, že k-teplota patří geometrii prostoročasu, nikoli kvantovým polím žijícím na tomto pozadí.

Následně navrhuje, že by taková teplota *mohla* souviset s gravitonovým zářením namísto běžné emise částic. To je otázka pro budoucnost, nikoli výsledek článku. Nejprve by bylo nutné teorii kvantovat, aby bylo možné zjistit, zda její teploty vůbec odpovídají nějakému záření.

Co tento výsledek nedokazuje

- **Pozorováním neukazuje**, že gravitace emerguje z entropie.
- **Neprokazuje**, že efektivní člen modelu je temnou energií měřenou v kosmologii.
- **Nenahrazuje** obecnou relativitu ověřenou nadřazenou teorií. Obecná relativita zde vystupuje jako limita návrhu pro nízké energie a malé zakřivení.
- **Nedělá** z Friedmannových kosmologií přesná řešení GfE. Jsou aproximací použitou k odhadu termodynamického chování modelu.
- **Neodvozuje** úplný mikroskopický počet stupňů volnosti prostoročasu.
- **Neposkytuje** hotovou teorii kvantové gravitace ani nedetekuje gravitony.
- **Neukazuje**, že záporné k-teploty jsou běžné záporné hodnoty na teploměru.

Jak silný je výsledek?

Jde o recenzovaný teoretický článek, takže „důkaz“ zde znamená něco jiného než v experimentu. Správnými otázkami jsou, zda jsou definice konzistentní, zda odvození platí a zda jsou aproximace uvedeny a kontrolovány.

Na této úrovni poskytuje článek konkrétní termodynamický slovník pro GfE a odvozuje strukturu prvního zákona, místo aby se opíral pouze o analogii. Také neobvykle zřetelně vymezuje hranice aproximace: Friedmannova řešení jsou převzata z obecné relativity, vložena do veličin GfE a omezena na režim, v němž zůstává indukovaná metrika dobře definovaná.

Širší fyzikální tvrzení zůstávají otevřená. Rámec je nový, tento článek neporovnává jeho kosmologii s daty a některé nejzajímavější důsledky — kvantování, kontaktně-geometrická dynamika a možné gravitonové záření — jsou představeny jako směry budoucí práce. Vnitřní konzistence je pro novou

teorii gravitace nezbytná. Nestačí však k prokázání, že teorie popisuje přírodu.

Proč na tom záleží

Vztah mezi gravitací a termodynamikou je starý a hluboký, od entropie černých děr po teplotu de Sitterova prostoru. Mnohé z těchto výsledků jsou uspořádány kolem horizontů. GfE se namísto toho snaží vybudovat lokální, objemovou informační míru přímo ze vztahu mezi hmotou a geometrií.

Zda návrh obstojí, zůstává otevřenou otázkou. Termodynamické cvičení však odhaluje užitečný cíl pro jakoukoli podobnou teorii: měla by vysvětlit, jak mohou lokální struktura a klesající lokální hustota entropie koexistovat s rostoucí celkovou entropií v rozpínajícím se vesmíru.

Tento článek ukazuje jeden matematicky explicitní způsob, jak se to může stát. Jeho hodnota nespočívá v uzavření problému gravitace a entropie. Převádí část tohoto problému do rovnic, jejichž předpoklady, omezení a další testy lze jasně formulovat.

Stručné shrnutí

Bianconi odvozuje termodynamický popis uvnitř Gravity From Entropy, navrženého rámce modifikované gravitace založeného na geometrické kvantové relativní entropii. Lokální veličiny entropie, energie, teploty a tlaku v modelu splňují první zákon. Když jsou úplné veličiny GfE vyhodnoceny v nízkoenergetických Friedmannových aproximacích s malým zakřivením, lokální hustoty entropie a energie při rozpínání vesmíru klesají, zatímco celková entropie díky růstu objemu prostoročasu stoupá; v příkladech ovládaných hmotou a zářením se celková energie v hlavním řádu blíží konstantě. Kauzální diamant v de Sitterově prostoru poskytuje entropii škálující jako H^{-2}, ale teplotu modelu odlišnou od standardní teploty horizontu. Jde o podmíněné matematické výsledky uvnitř GfE, nikoli o pozorovací důkaz, že gravitace pochází z entropie, měření temné energie nebo dokončenou teorii kvantové gravitace.

Zdroje

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