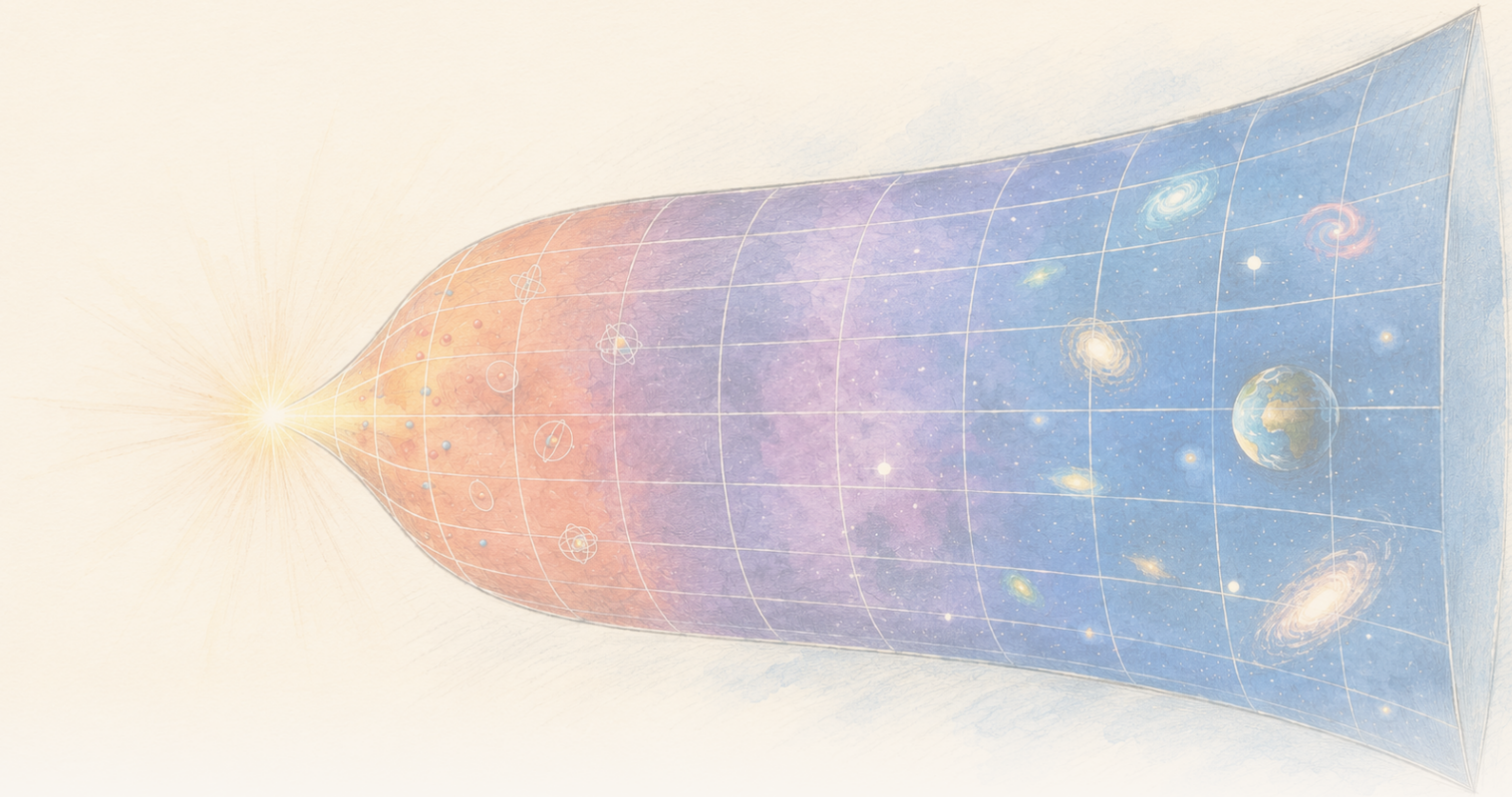

The Clean Paper

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

Di dalam model gravitasi berbasis entropi, kepadatan entropi lokal turun sementara jumlah totalnya meningkat

Sebuah makalah Physical Review D menurunkan temperatur, tekanan, dan hukum pertama di dalam Gravity From Entropy, sebuah kerangka gravitasi termodifikasi yang diusulkan. Dalam pendekatan Friedmann pada waktu akhir, energi rendah, dan kelengkungan kecil, kepadatan entropi dan energi lokal model turun sementara ekspansi membuat entropi total meningkat. Perhitungannya konkret secara internal tetapi bersyarat: kosmologi Friedmann bukan solusi eksak teori lengkap, dan ini bukan bukti observasional bahwa gravitasi berasal dari entropi, penjelasan atas energi gelap yang terukur, atau teori gravitasi kuantum yang telah selesai.

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

Volume yang membesar dapat menurunkan kepadatan sambil menaikkan jumlah total

Jika dalam model ini kepadatan entropi menurun ketika alam semesta mengembang, bagaimana mungkin entropi totalnya tetap meningkat?

Bayangkan alam semesta yang mengembang dibagi menjadi sel-sel kecil. Jumlah sesuatu di setiap sel dapat berkurang sementara jumlah total di seluruh wilayah yang terus membesar justru meningkat. Penurunan kepadatan dan kenaikan jumlah total tidak saling bertentangan ketika volumenya sendiri berubah.

Persoalan perhitungan sederhana itu berada di pusat sebuah makalah teoretis yang jauh lebih ambisius. Dalam Physical Review D, fisikawan matematika Ginestra Bianconi mengembangkan deskripsi termodinamika untuk **Gravity From Entropy** (GfE), sebuah model yang baru-baru ini diajukan, di mana gravitasi dikodekan melalui hubungan berbasis teori informasi antara materi dan geometri. Di sini, "berbasis teori informasi" berarti model berangkat dari ukuran matematis tentang seberapa berbeda dua deskripsi geometri: geometri fisik dan geometri yang diinduksi oleh materi serta kelengkungan.

Makalah ini menurunkan besaran lokal yang disebut k-entropi, k-energi, k-temperatur, dan k-tekanan. Awalan k memisahkan sektor geometri yang berbeda dalam model; ini bukan zat yang berbeda atau era kosmik yang berbeda. Hubungan hukum pertama mereka memiliki bentuk matematis yang sama seperti dalam termodinamika: perubahan energi terkait dengan temperatur dikali perubahan entropi, dikurangi tekanan dikali perubahan volume.

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

Makalah kemudian mengevaluasi besaran-besaran tersebut menggunakan kosmologi Friedmann yang mengembang: alam semesta ideal standar yang homogen dan isotropik pada skala besar. Dalam rezim energi rendah dan kelengkungan kecil, contoh yang didominasi materi dan radiasi memiliki kepadatan entropi dan energi lokal yang menurun, tetapi ekspansi menyediakan volume yang cukup besar sehingga entropi total meningkat. Energi total mendekati suatu konstanta pada orde terdepan, yaitu setelah mempertahankan suku dominan pada waktu besar dan mengabaikan suku yang memudar lebih cepat seiring waktu.

Itu adalah hasil matematis yang rapi. Batasnya sama pentingnya: perhitungan dilakukan **di dalam satu teori yang diusulkan**, dan kosmologi Friedmann yang digunakan untuk contoh konkret hanyalah **pendekatan**, bukan solusi eksak dari persamaan GfE lengkap. Persamaan gerak tersebut berasal dari variasi aksi GfE yang diusulkan dan mencakup medan-G dinamis serta sektor geometri orde lebih tinggi yang tidak ada dalam persamaan Friedmann biasa. Makalah ini tidak mengamati entropi menghasilkan gravitasi, tidak mengidentifikasi energi gelap di Alam Semesta kita, dan tidak menyelesaikan teori gravitasi kuantum.

Apa yang diasumsikan Gravity From Entropy

Relativitas umum menggambarkan gravitasi melalui geometri ruang-waktu. Materi memberi tahu ruang-waktu bagaimana harus melengkung, dan kelengkungan itu memberi tahu materi bagaimana harus bergerak. GfE berangkat dari aksi berbeda yang diusulkan: objek yang berkaitan dengan metrik diperlakukan sebagai operator kuantum dan Lagrangiannya dibangun dari **Geometric Quantum Relative Entropy** (GQRE).

> **Tiga istilah dalam 120 detik**
>
> **Operator kuantum** adalah aturan matematis yang bekerja pada keadaan kuantum dan mewakili suatu besaran atau transformasi. GfE mengasumsikan bahwa objek-objek terkait metriknya dapat diperlakukan seperti ini; artikel ini tidak meminta pembaca untuk mereproduksi konstruksi tersebut.
> **Lagrangian** adalah resep matematis ringkas untuk dinamika suatu teori. Integrasikan Lagrangian di seluruh ruang-waktu untuk memperoleh aksi, lalu variasikan aksi itu untuk menurunkan persamaan medan.
> **GQRE** adalah Lagrangian khusus model yang dipilih oleh GfE. Ia mengadaptasi gagasan entropi relatif kuantum untuk membandingkan metrik fisik dengan metrik orde lebih tinggi yang diinduksi oleh materi dan kelengkungan. Menyebutnya entropi tidak menjadikannya entropi panas biasa.

Entropi relatif biasanya merupakan ukuran keterbedaan antara dua distribusi probabilitas atau dua keadaan kuantum. Dalam GfE, perbandingannya adalah antara metrik fisik dan metrik orde lebih tinggi yang diinduksi oleh materi serta kelengkungan. “Orde lebih tinggi” bukan berarti dimensi ruang-waktu tambahan. Maksudnya adalah model mengemas sektor geometri skalar, bertipe vektor, dan bertipe bivektor ke dalam satu objek yang diperluas. Sebuah **medan-G** dinamis menghubungkan komponen-komponen ini dan “mendandani” metrik yang digunakan baik pada bagian gravitasi maupun bagian materi dari model. Kerangka ini dibangun sedemikian rupa sehingga, pada batas energi rendah dan kelengkungan kecil, aksinya mereduksi menjadi aksi Einstein-Hilbert dari relativitas umum ditambah aksi materi.

Kalimat terakhir itu mudah dibaca terlalu jauh. Memulihkan persamaan Einstein dalam suatu batas adalah sasaran konsistensi bagi usulan tersebut. Itu tidak menunjukkan bahwa alam menggunakan teori yang lebih besar di luar batas itu.

Persamaan medan GfE juga mengandung suku dinamis yang oleh kerangka ini disebut **suku energi gelap efektif yang muncul**. Dalam makalah ini, Bianconi mengidentifikasi kepadatan energi internal model dengan suku tersebut. “Energi gelap efektif” menggambarkan perannya dalam persamaan. Itu bukan identifikasi empiris dengan energi gelap yang disimpulkan dari pengamatan kosmologi.

> **Tiga penggunaan berbeda dari kata “entropi”**
>
> **Entropi termodinamika biasa** menghitung berapa banyak susunan mikroskopis yang dapat

> menghasilkan suatu keadaan makroskopis. **Entropi relatif kuantum** mengukur seberapa dapat dibedakan dua keadaan kuantum. **GQRE** dalam makalah ini adalah konstruksi geometri khusus model yang terinspirasi oleh entropi relatif dan digunakan sebagai Lagrangian gravitasi. Nama yang mirip tidak membuat besaran-besaran ini dapat saling dipertukarkan; makalah menurunkan hubungan yang digunakannya di dalam GfE.

Hasil termodinamika eksak di dalam model

Makalah pertama-tama bekerja pada tingkat kerangka GfE itu sendiri. Untuk setiap orde dan jenis derajat kebebasan geometri, yang diindeks oleh k, ia mendefinisikan:

- k-entropi lokal dari GQRE;
- k-energi lokal dari kepadatan energi internal model;
- k-temperatur konjugat;
- dan k-tekanan.

Besaran-besaran ini mematuhi hukum pertama lokal. Dalam notasi makalah,

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

Indeks k bukan daftar zat yang berbeda atau era Alam Semesta yang berbeda. Dalam perhitungan homogen dan isotropik, indeks itu menamai lima entri: satu entri skalar; entri timelike dan spacelike yang terpisah dari sektor bertipe vektor; serta entri waktu-ruang dan ruang-ruang yang terpisah dari sektor bertipe bivektor. Skalar tidak memiliki indeks arah, entri bertipe vektor membedakan arah temporal dari spasial, dan bivektor dibangun dari pasangan arah. Setiap sektor dapat memiliki temperatur dan tekanannya sendiri. k-temperatur juga dapat bernilai positif atau negatif, bergantung pada komponen medan-G yang bersesuaian.

Ini bukan temperatur yang diukur dengan menempatkan termometer di dekat horizon kosmologis. Temperatur medan kuantum de Sitter standar berskala dengan H: **temperatur Gibbons-Hawking** diberikan pada horizon kosmologis, sedangkan **vakum Bunch-Davies** adalah keadaan kuantum standar yang invarian terhadap de Sitter, yang korelasi medannya menghasilkan respons termal terkait. Makalah secara eksplisit membedakan keduanya dari k-temperatur geometrinya, yang pada contoh de Sitter berskala dengan H^2. Di sini, “temperatur” adalah nama bagi variabel konjugat termodinamika yang diturunkan dari definisi entropi dan energi model.

Jadi identitas yang menyerupai hukum pertama memang benar-benar diturunkan, tetapi hasilnya **berlaku di dalam kerangka model**: jika aksi dan definisi GfE diterima, struktur termodinamika ini mengikuti.

Mengapa perhitungan Friedmann adalah pendekatan

Untuk mengubah formalisme menjadi contoh kosmologis, makalah menggunakan ruang-waktu Friedmann-Robertson-Walker (FRW) yang homogen dan isotropik. "Homogen" berarti model skala besar memiliki sifat rata-rata yang sama di setiap lokasi; "isotropik" berarti terlihat sama ke segala arah. Satu faktor skala menggambarkan bagaimana jarak bertambah seiring waktu, materi direpresentasikan sebagai fluida sempurna yang halus, dan parameter Hubble H merangkum laju ekspansi. Ini adalah latar ideal, bukan peta galaksi individual.

Namun ada ketidakcocokan struktural. Alam semesta Friedmann menyelesaikan persamaan Einstein. Secara umum, ia tidak menyelesaikan persamaan GfE orde lebih tinggi yang lengkap, yang juga melacak sektor skalar, bertipe vektor, dan bertipe bivektor serta turunan medan-G. Persamaan Einstein muncul kembali hanya pada batas orde pertama, energi rendah, dan kelengkungan kecil dari usulan tersebut.

Makalah menyatakan hal ini secara langsung dan memperlakukan solusi Friedmann sebagai pendekatan, dengan cara yang dibandingkan dengan memasukkan solusi medan-rata-rata ke dalam teori yang lebih lengkap untuk menguji di mana pendekatan itu masih dapat dipercaya. Rezim ini membutuhkan energi rendah dan kelengkungan kecil, diringkas oleh $l_P H \ll 1$, dengan l_P sebagai panjang Planck. Kondisi kedua mensyaratkan hasil kali metrik orde lebih tinggi yang diinduksi dan invers metrik fisik orde lebih tinggi tetap definit positif.

Karena itu, hasilnya bukan "GfE memprediksi sejarah Alam Semesta kita." Hasilnya lebih dekat pada: **jika suatu alam semesta GfE dapat didekati dengan cukup baik oleh kosmologi Friedmann yang familier, inilah skala termodinamika yang dihasilkan oleh besaran GfE lengkap.**

Hasil lokal versus total

Di dalam rezim tersebut, besaran lokal terdepan memiliki skala sederhana:

- kepadatan entropi model berskala sebagai H^2;
- kepadatan energi model berskala sebagai H^4;
- untuk contoh Friedmann non-de Sitter pada waktu akhir, keduanya menjadi kira-kira t^{-2} dan t^{-4}.

Kedua kepadatan itu menurun ketika alam semesta mengembang. Namun kepadatan bukanlah jumlah total.

Ketika makalah mengintegrasikan sepanjang wilayah ruang-waktu yang mengembang, volume yang terus bertambah mengubah jawabannya. Untuk contoh yang familiar secara fisik—alam semesta yang didominasi materi dan yang didominasi radiasi—entropi total meningkat seiring waktu walaupun entropi per satuan volume menurun. Energi total tidak terus meningkat; pada orde terdepan ia mendekati suatu konstanta.

Inilah hasil konseptual paling berguna dalam makalah. Pengurutan lokal atau pengenceran tidak

otomatis bertentangan dengan hukum kedua global. Suatu wilayah dapat menjadi kurang entropik secara lokal per satuan volume sementara entropi terintegrasi meningkat karena volume ruang-waktu tumbuh lebih cepat.

Perhitungan ini tidak membuktikan bahwa itulah penjelasan mikroskopis yang benar untuk panah termodinamika di Alam Semesta nyata. Ia menunjukkan bahwa kerangka yang diusulkan dapat menampung pemisahan lokal-global tersebut tanpa kontradiksi dalam pendekatan Friedmann-nya.

Perbandingan de Sitter, dengan temperatur yang berbeda

Makalah juga mempertimbangkan ruang de Sitter, ruang-waktu ideal yang mengembang secara eksponensial dengan H konstan. Untuk satu pengamat, integrasi hanya dilakukan pada **berlian kausal** yang terbatas: irisan antara kerucut cahaya masa depan dari peristiwa yang lebih awal dan kerucut cahaya masa lalu dari peristiwa yang lebih akhir, yang membatasi wilayah ruang-waktu yang dapat ikut serta dalam pengamatan di antara keduanya. Pada berlian itu, entropi total GfE berskala sebagai H^{-2}, sama dengan skala terhadap H pada entropi Gibbons-Hawking yang familier. Energi total GfE berorde satu dalam satuan model.

> **Satu keluarga latar kosmologis**
>
> FRW adalah keluarga geometri homogen dan isotropik, bukan satu tempat tambahan. Alam semesta yang didominasi materi dan radiasi adalah kasus FRW yang dibedakan oleh apa yang mengisi model. Ruang de Sitter juga dapat ditulis dalam bentuk FRW, tetapi mewakili kasus yang didominasi vakum dengan H konstan dan ekspansi eksponensial. Berlian kausal adalah wilayah terbatas yang dipilih di dalam ruang-waktu itu untuk satu pengamat; itu bukan jenis alam semesta lain.

Kecocokan skala tidak sama dengan menurunkan objek fisik yang sama. k-temperatur GfE terkait berskala sebagai H^2, tidak seperti temperatur de Sitter standar yang berskala sebagai H. Makalah menafsirkan perbedaan ini sebagai indikasi bahwa k-temperatur merupakan milik geometri ruang-waktu, bukan medan kuantum yang hidup di atas latar tersebut.

Makalah kemudian mengusulkan bahwa temperatur semacam itu *mungkin* berkaitan dengan radiasi graviton, bukan emisi partikel biasa. Itu adalah pertanyaan masa depan, bukan hasil makalah ini. Teorinya terlebih dahulu perlu dikuantisasi untuk menetapkan apakah temperaturnya benar-benar berkaitan dengan radiasi.

Apa yang tidak dibuktikan

- Makalah ini **tidak** menunjukkan secara observasional bahwa gravitasi muncul dari entropi.
- Makalah ini **tidak** menetapkan bahwa suku efektif model adalah energi gelap yang diukur dalam

kosmologi.
- Makalah ini **tidak** menggantikan relativitas umum dengan teori superior yang telah teruji. Relativitas umum muncul di sini sebagai batas energi rendah dan kelengkungan kecil dari usulan tersebut.
- Makalah ini **tidak** menjadikan kosmologi Friedmann sebagai solusi eksak GfE. Kosmologi tersebut adalah pendekatan yang digunakan untuk memperkirakan perilaku termodinamika model.
- Makalah ini **tidak** menurunkan penghitungan mikroskopis lengkap atas derajat kebebasan ruang-waktu.
- Makalah ini **tidak** menyediakan teori gravitasi kuantum yang selesai atau mendeteksi graviton.
- Makalah ini **tidak** menunjukkan bahwa k-temperatur negatif adalah pembacaan termometer negatif biasa.

Seberapa kuat hasilnya?

Ini adalah makalah teoretis yang ditinjau sejawat, sehingga "bukti" memiliki arti berbeda dari eksperimen. Pertanyaan yang tepat adalah apakah definisinya koheren, apakah derivasi mengikuti dengan benar, dan apakah pendekatannya dinyatakan serta dikendalikan.

Pada tingkat itu, makalah menyediakan kamus termodinamika konkret untuk GfE dan menurunkan struktur hukum pertama, bukan sekadar mengandalkan analogi. Makalah juga membuat batas pendekatannya sangat terlihat: solusi Friedmann dipinjam dari relativitas umum, dimasukkan ke dalam besaran GfE, dan dibatasi pada rezim di mana metrik terinduksi tetap berperilaku baik.

Klaim fisik yang lebih besar masih terbuka. Kerangka ini masih baru, makalah ini tidak membandingkan kosmologinya dengan data, dan beberapa implikasinya yang paling menarik—kuantisasi, dinamika geometri kontak, dan kemungkinan radiasi graviton—disajikan sebagai arah kerja masa depan. Konsistensi internal diperlukan bagi teori gravitasi baru. Itu belum cukup untuk menunjukkan bahwa teori tersebut menggambarkan alam.

Mengapa ini penting

Hubungan antara gravitasi dan termodinamika sudah lama dan mendalam, dari entropi lubang hitam hingga temperatur ruang de Sitter. Banyak hasil tersebut diorganisasi di sekitar horizon. GfE mencoba pendekatan berbeda: membangun ukuran informasi lokal dan volumetrik langsung dari hubungan antara materi dan geometri.

Apakah usulan itu akan bertahan masih merupakan pertanyaan terbuka. Namun analisis termodinamika ini memperjelas satu tuntutan penting bagi teori semacam itu: teori harus menjelaskan bagaimana struktur lokal dan kepadatan entropi lokal yang menurun dapat hidup berdampingan dengan entropi total yang meningkat di alam semesta yang mengembang.

Makalah ini menunjukkan satu cara yang eksplisit secara matematis agar hal itu dapat terjadi. Ni-

lainya bukan karena masalah gravitasi–entropi sudah selesai, melainkan karena sebagian persoalan itu kini dapat dinyatakan sebagai persamaan dengan asumsi, batas, dan pengujian lanjutan yang jelas.

Singkatnya

Bianconi menurunkan deskripsi termodinamika di dalam Gravity From Entropy, sebuah kerangka gravitasi termodifikasi yang diusulkan dan didasarkan pada entropi relatif kuantum geometris. Variabel entropi, energi, temperatur, dan tekanan lokal model memenuhi hukum pertama. Ketika besaran GfE lengkap dievaluasi pada pendekatan Friedmann berenergi rendah dan berkelengkungan kecil, kepadatan entropi dan energi lokal turun ketika alam semesta mengembang, sementara entropi total naik karena volume ruang-waktu tumbuh; energi total mendekati konstanta pada orde terdepan untuk contoh yang didominasi materi dan radiasi. Sebuah berlian kausal de Sitter menghasilkan entropi yang berskala sebagai H^{-2}, tetapi temperatur modelnya berbeda dari temperatur horizon standar. Ini adalah hasil matematis bersyarat di dalam GfE, bukan bukti observasional bahwa gravitasi berasal dari entropi, pengukuran energi gelap, atau teori gravitasi kuantum yang telah selesai.

Sumber

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