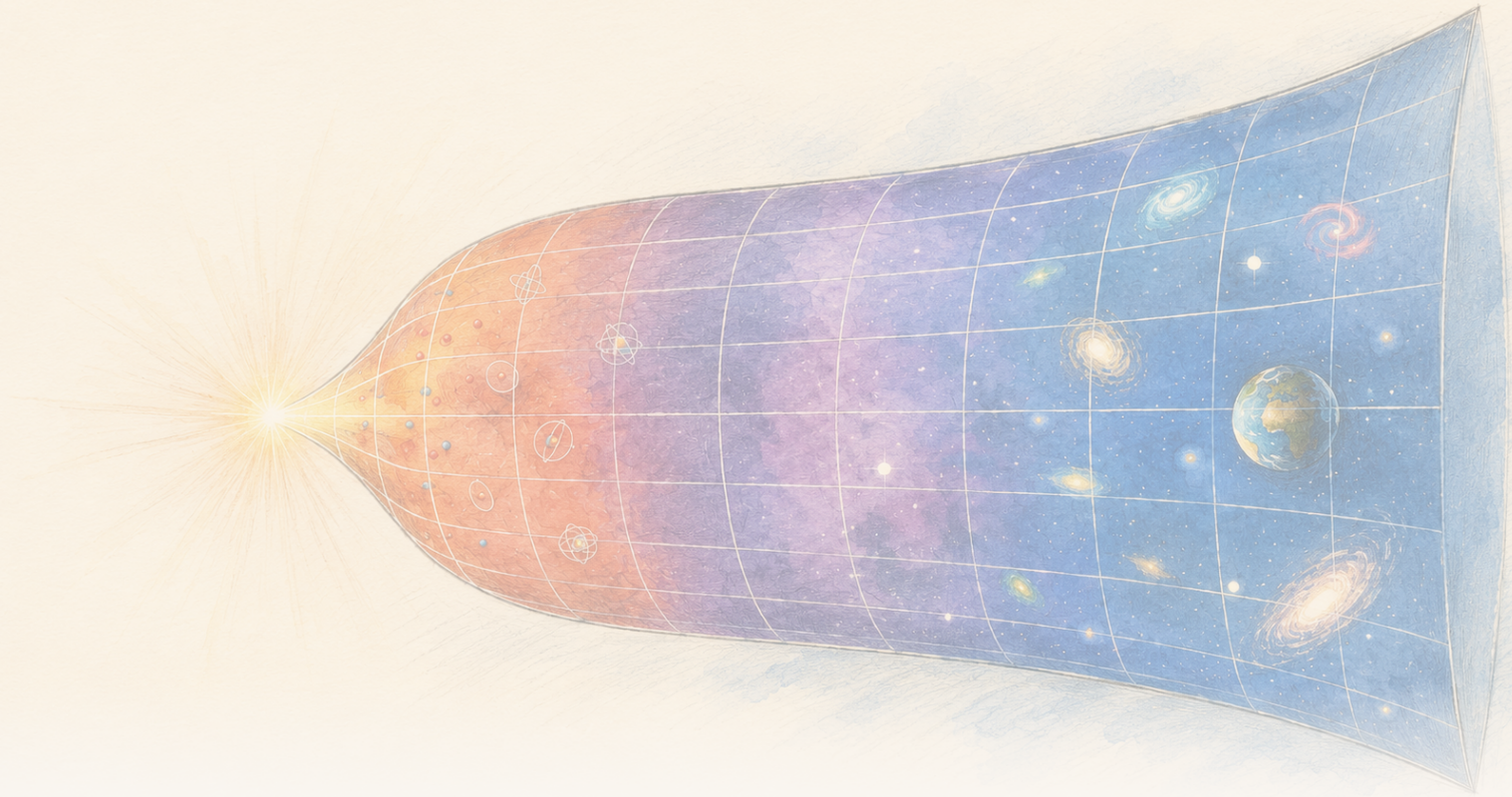

The Clean Paper

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

# Dalam model graviti berasaskan entropi, ketumpatan entropi setempat menurun sementara jumlah keseluruhannya meningkat

*Kertas Physical Review D menerbitkan ungkapan bagi suhu, tekanan dan hukum pertama dalam Gravity From Entropy, sebuah rangka kerja graviti terubah suai yang dicadangkan. Dalam penghampiran Friedmann pada masa lewat, tenaga rendah dan kelengkungan kecil, ketumpatan entropi dan tenaga setempat model menurun sementara pengembangan menyebabkan jumlah entropi meningkat. Pengiraannya konsisten secara dalaman tetapi bersyarat: kosmologi Friedmann bukan penyelesaian tepat bagi teori penuh, dan hasil ini bukan bukti pemerhatian bahawa graviti berasal daripada entropi, bukan penjelasan terukur bagi tenaga gelap dan bukan teori graviti kuantum yang lengkap.*

---

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

# Apabila isipadu bertambah, ketumpatan boleh menurun walaupun jumlah keseluruhan meningkat

Jika dalam model ini ketumpatan entropi menurun ketika alam semesta mengembang, bagaimana mungkin entropi jumlah keseluruhannya tetap meningkat?

Bayangkan alam semesta yang mengembang dibahagi menjadi sel-sel kecil. Jumlah sesuatu di setiap sel dapat berkurang sementara jumlah keseluruhan di keseluruhan kawasan yang terus membesar malah meningkat. Penurunan ketumpatan dan kenaikan jumlah keseluruhan tidak saling bertentangan apabila isipadunya sendiri berubah.

Persoalan pengiraan ringkas itu menjadi asas kepada kajian teori yang jauh lebih bercita-cita tinggi. Dalam Physical Review D, ahli fizik matematik Ginestra Bianconi membangunkan huraian termodinamik bagi **Gravity From Entropy** (GfE), sebuah model yang baru-baru ini dicadangkan, di mana graviti dikodkan melalui hubungan berasaskan teori maklumat antara bahan dan geometri. Di sini, "berasaskan teori maklumat" bermakna model bermula daripada ukuran matematik tentang sejauh mana dua huraian berbeza geometri: geometri fizikal dan geometri yang teraruh oleh bahan serta kelengkungan.

Kajian ini menurunkan beberapa kuantiti setempat yang dinamakan k-entropi, k-tenaga, k-suhu dan k-tekanan. Awalan $k$ memisahkan sektor geometri yang berbeza dalam model; ini bukan jenis bahan yang berbeza atau era kosmik yang berbeza. Hubungan ala hukum pertama bagi kuantiti ini mempunyai struktur yang sama seperti dalam termodinamik: perubahan tenaga berkaitan dengan suhu didarab dengan perubahan entropi, ditolak tekanan didarab dengan perubahan isipadu.

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

Kajian kemudian menilai kuantiti tersebut menggunakan kosmologi Friedmann yang mengembang: alam semesta ideal piawai yang homogen dan isotropik pada skala besar. Dalam rejim tenaga rendah dan kelengkungan kecil, contoh yang didominasi bahan dan sinaran mempunyai ketumpatan entropi dan tenaga setempat yang menurun, tetapi pengembangan menyediakan isipadu yang cukup besar sehingga entropi keseluruhan meningkat. Tenaga keseluruhan menghampiri suatu pemalar pada tertib terdepan, iaitu selepas mengekalkan terma dominan pada masa besar dan mengabaikan terma yang memudar lebih cepat apabila masa berlalu.

Itu ialah hasil matematik yang kemas. Hadnya sama penting: pengiraan dilakukan **di dalam satu teori yang dicadangkan**, dan kosmologi Friedmann yang digunakan untuk contoh konkrit hanyalah **pendekatan**, bukan penyelesaian tepat bagi persamaan GfE lengkap. Persamaan gerakan tersebut berasal daripada variasi aksi GfE yang dicadangkan dan merangkumi medan-G dinamik serta sektor geometri tertib lebih tinggi yang tiada dalam persamaan Friedmann biasa. Kajian ini tidak memerhati entropi menghasilkan graviti, tidak mengenal pasti tenaga gelap di Alam semesta kita, dan tidak menyelesaikan teori graviti kuantum.

# Apa yang diandaikan oleh Gravity From Entropy

Relativiti umum menggambarkan graviti melalui geometri ruang-masa. Bahan memberitahu ruang-masa bagaimana perlu melengkung, dan kelengkungan itu memberitahu bahan bagaimana perlu bergerak. GfE bermula daripada satu aksi berbeza yang dicadangkan: objek yang berkaitan dengan metrik dianggap sebagai operator kuantum dan Lagrangiannya dibina dari **Geometric Quantum Relative Entropy** (GQRE).

### Tiga istilah dalam 120 saat

**Operator kuantum** adalah peraturan matematik yang berfungsi pada keadaan kuantum dan mewakili suatu kuantiti atau transformasi. GfE mengandaikan bahawa objek-objek berkaitan metriknya boleh dianggap sedemikian; artikel ini tidak meminta pembaca untuk menghasilkan semula pembinaan tersebut.
**Lagrangian** ialah formula matematik ringkas yang merumuskan dinamik sesuatu teori. Dengan mengintegrasikan Lagrangian merentasi ruang-masa, kita memperoleh aksi; variasi terhadap aksi itu kemudian menghasilkan persamaan medan.
**GQRE** adalah Lagrangian khusus model yang dipilih oleh GfE. Ia menyesuaikan idea entropi relatif kuantum untuk membandingkan metrik fizikal dengan metrik tertib lebih tinggi yang teraruh oleh bahan dan kelengkungan. Menyebutnya entropi tidak menjadikannya entropi panas biasa.

Entropi relatif biasanya mengukur sejauh mana dua taburan kebarangkalian atau dua keadaan kuantum berbeza. Dalam GfE, perbandingannya adalah antara metrik fizikal dan metrik tertib lebih tinggi yang teraruh oleh bahan serta kelengkungan. “tertib lebih tinggi” bukan bermakna dimensi ruang-masa tambahan. Maksudnya, model menggabungkan sektor geometri skalar, jenis vektor dan jenis bivektor ke dalam satu objek yang diperluas. Sebuah **medan-G** dinamik menghubungkan komponen ini dan mengubah suai metrik yang digunakan pada bahagian graviti serta bahagian bahan dalam model. Rangka kerja ini dibina supaya, pada had tenaga rendah dan kelengkungan kecil, aksinya menjadi aksi Einstein-Hilbert daripada relativiti umum ditambah aksi bahan.

Ayat terakhir itu mudah dibaca terlalu jauh. Memulihkan persamaan Einstein dalam suatu had adalah sasaran konsistensi bagi cadangan tersebut. Itu tidak menunjukkan bahawa alam menggunakan teori yang lebih besar di luar had itu.

Persamaan medan GfE juga mengandungi terma dinamik yang oleh rangka kerja ini disebut **terma tenaga gelap berkesan yang muncul**. Dalam kajian ini, Bianconi mengenal pasti ketumpatan tenaga dalaman model dengan terma tersebut. “Tenaga gelap berkesan” menggambarkan peranannya dalam persamaan. Itu bukan pengenalpastian berdasarkan pemerhatian dengan tenaga gelap yang disimpulkan daripada data kosmologi.

### Tiga penggunaan berbeza daripada kata “entropi”

**Entropi termodinamik biasa** mengira berapa banyak susunan mikroskopik yang dapat

> menghasilkan suatu keadaan makroskopis. **Entropi relatif kuantum** mengukur sejauh mana dapat dibezakan dua keadaan kuantum. **GQRE** dalam kajian ini adalah pembinaan geometri khusus model yang terinspirasi oleh entropi relatif dan digunakan sebagai Lagrangian graviti. Nama yang serupa tidak membuat kuantiti ini dapat saling dipertukarkan; kajian menurunkan hubungan yang digunakannya di dalam GfE.

# Hasil termodinamik tepat di dalam model

Kajian mula-mula bekerja pada peringkat rangka kerja GfE itu sendiri. Untuk setiap tertib dan jenis darjah kebebasan geometri, yang diindeks oleh $k$, ia mendefinisikan:

- k-entropi setempat dari GQRE;
- k-tenaga setempat dari ketumpatan tenaga dalaman model;
- k-suhu konjugat;
- dan k-tekanan.

Kuantiti-kuantiti ini mematuhi hukum pertama setempat. Dalam notasi kajian,

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

Indeks $k$ bukan senarai bahan yang berbeza atau era Alam semesta yang berbeza. Dalam pengiraan homogen dan isotropik, indeks itu menamakan lima komponen: satu komponen skalar; komponen timelike dan spacelike yang berasingan dari sektor berjenis vektor; serta komponen masa-ruang dan ruang-ruang yang berasingan dari sektor berjenis bivektor. Skalar tidak mempunyai indeks arah, komponen berjenis vektor membezakan arah temporal dari spasial, dan bivektor dibina dari pasangan arah. Setiap sektor boleh mempunyai suhu dan tekanannya sendiri. k-suhu juga dapat bernilai positif atau negatif, bergantung pada komponen medan-G yang bersesuaian.

Ini bukan suhu yang diukur dengan menempatkan termometer di dekat ufuk kosmologi. Suhu medan kuantum de Sitter piawai berskala dengan $H$: **suhu Gibbons-Hawking** diberikan pada ufuk kosmologi, manakala **vakum Bunch-Davies** adalah keadaan kuantum piawai yang invarian terhadap de Sitter, yang korelasi medannya menghasilkan respons termal berkaitan. Kajian secara jelas membezakan kedua-duanya dari k-suhu geometrinya, yang pada contoh de Sitter berskala dengan $H^2$. Di sini, “suhu” adalah nama bagi pemboleh ubah konjugat termodinamik yang diturunkan dari definisi entropi dan tenaga model.

Jadi, hubungan ala hukum pertama itu memang terhasil secara matematik, tetapi ia tetap **hasil yang hanya berlaku di dalam model**: jika aksi dan takrif GfE diterima, struktur termodinamik tersebut mengikutinya.

# Mengapa pengiraan Friedmann ialah suatu penghampiran

Untuk mengubah formalisme menjadi contoh kosmologi, kajian menggunakan ruang-masa Friedmann-Robertson-Walker (FRW) yang homogen dan isotropik. “Homogen” bermakna model skala besar mempunyai sifat purata yang sama di setiap lokasi; “isotropik” bermakna kelihatan sama ke segala arah. Satu faktor skala menggambarkan bagaimana jarak bertambah seiring masa, bahan diwakili sebagai fluida sempurna yang halus, dan parameter Hubble $H$ merangkum kadar pengembangan. Ini adalah latar ideal, bukan peta galaksi individu.

Namun struktur kedua-duanya tidak sepadan sepenuhnya. Alam semesta Friedmann menyelesaikan persamaan Einstein. Secara umum, ia tidak menyelesaikan persamaan GfE tertib lebih tinggi yang lengkap, yang juga menjejak sektor skalar, berjenis vektor, dan berjenis bivektor serta turunan medan-G. Persamaan Einstein muncul kembali hanya pada had tertib pertama, tenaga rendah, dan kelengkungan kecil dari cadangan tersebut.

Kajian menyatakan perkara ini dengan jelas dan menggunakan penyelesaian Friedmann hanya sebagai penghampiran, seumpama memasukkan penyelesaian medan min ke dalam teori yang lebih lengkap untuk menguji sejauh mana penghampiran itu masih boleh dipercayai. rejim ini memerlukan tenaga rendah dan kelengkungan kecil, dirumuskan oleh $l_P H \ll 1$, dengan $l_P$ sebagai panjang Planck. Keadaan kedua mensyaratkan hasil kali metrik tertib lebih tinggi yang teraruh dan invers metrik fizikal tertib lebih tinggi tetap definit positif.

Oleh itu, hasilnya bukan “GfE meramalkan sejarah Alam semesta kita.” Lebih tepat dikatakan: **jika suatu alam semesta GfE boleh didekati dengan cukup baik oleh kosmologi Friedmann yang lazim, inilah skala termodinamik yang dihasilkan oleh kuantiti GfE lengkap.**

# Hasil setempat berbanding hasil keseluruhan

Di dalam rejim tersebut, kuantiti setempat terdepan mempunyai skala ringkas:

- ketumpatan entropi model berskala sebagai $H^2$;
- ketumpatan tenaga model berskala sebagai $H^4$;
- untuk contoh Friedmann bukan de Sitter pada masa lewat, kedua-duanya menjadi kira-kira $t^{-2}$ dan $t^{-4}$.

Kedua ketumpatan itu menurun ketika alam semesta mengembang. Namun ketumpatan bukanlah jumlah keseluruhan.

Ketika kajian mengintegrasikan sepanjang kawasan ruang-masa yang mengembang, isipadu yang terus bertambah mengubah jawapannya. Untuk contoh yang biasa secara fizikal—alam semesta yang didominasi bahan dan yang didominasi sinaran—entropi keseluruhan meningkat seiring masa walaupun entropi per unit isipadu menurun. Tenaga keseluruhan tidak terus meningkat; pada tertib terdepan ia menghampiri suatu pemalar.

Inilah hasil konseptual yang paling berguna dalam kajian. Penurunan ketumpatan setempat tidak semestinya bercanggah dengan hukum kedua pada skala keseluruhan. Suatu kawasan dapat menjadi kurang entropik secara setempat per unit isipadu sementara jumlah entropi meningkat kerana isipadu ruang-masa berkembang dengan lebih cepat.

Pengiraan ini tidak membuktikan bahawa itulah penjelasan mikroskopik yang benar bagi arah termodinamik masa di Alam semesta sebenar. Ia menunjukkan bahawa rangka kerja yang dicadangkan boleh menampung pemisahan setempat-global tersebut tanpa kontradiksi dalam pendekatan Friedmann-nya.

## Perbandingan de Sitter, dengan suhu yang berbeza

Kajian juga mempertimbangkan ruang de Sitter, ruang-masa ideal yang mengembang secara eksponensial dengan $H$ malar. Untuk satu pemerhati, integrasi hanya dilakukan pada **berlian sebab-akibat** yang terhad: irisan antara kon cahaya masa depan dari peristiwa yang lebih awal dan kon cahaya masa lalu dari peristiwa yang lebih akhir, yang mengehadkan kawasan ruang-masa yang dapat ikut serta dalam pemerhatian di antara kedua-duanya. Pada berlian itu, entropi keseluruhan GfE berskala sebagai $H^{-2}$, sama dengan skala terhadap H pada entropi Gibbons-Hawking yang lazim. Tenaga keseluruhan GfE bertertib satu dalam unit model.

> **Satu keluarga latar kosmologi**
>
> FRW ialah keluarga geometri homogen dan isotropik, bukan satu tempat tambahan. Alam semesta yang didominasi bahan dan sinaran adalah kes FRW yang dibezakan oleh apa yang mengisi model. Ruang de Sitter juga boleh ditulis dalam bentuk FRW, tetapi mewakili kes yang didominasi vakum dengan $H$ malar dan pengembangan eksponensial. Berlian sebab-akibat adalah kawasan terhad yang dipilih di dalam ruang-masa itu untuk satu pemerhati; itu bukan jenis alam semesta lain.

Persamaan pada skala tertentu tidak bermakna kedua-duanya ialah objek fizikal yang sama. k-suhu GfE berkaitan berskala sebagai $H^2$, tidak seperti suhu de Sitter piawai yang berskala sebagai $H$. Kajian mentafsirkan perbezaan ini sebagai petunjuk bahawa k-suhu ialah sifat geometri ruang-masa, bukan sifat medan kuantum yang wujud di atas latar tersebut.

Kajian kemudian mencadangkan bahawa suhu sejenis itu *mungkin* berkaitan dengan sinaran graviton, bukan emisi zarah biasa. Itu adalah persoalan masa depan, bukan hasil kajian ini. Teorinya terlebih dahulu perlu dikuantisasi untuk menetapkan adakah temperaturnya benar-benar berkaitan dengan sinaran.

# Apa yang tidak dibuktikan

- Kajian ini **tidak** menunjukkan secara pemerhatian bahawa graviti muncul daripada entropi.
- Kajian ini **tidak** menetapkan bahawa terma berkesan model adalah tenaga gelap yang diukur dalam kosmologi.
- Kajian ini **tidak** menggantikan relativiti umum dengan teori yang lebih unggul yang telah boleh diuji. Relativiti umum muncul di sini sebagai had tenaga rendah dan kelengkungan kecil dari cadangan tersebut.
- Kajian ini **tidak** menjadikan kosmologi Friedmann sebagai penyelesaian tepat GfE. Kosmologi tersebut adalah pendekatan yang digunakan untuk menganggarkan tingkah laku termodinamik model.
- Kajian ini **tidak** menurunkan pengiraan mikroskopik lengkap atas darjah kebebasan ruang-masa.
- Kajian ini **tidak** menyediakan teori graviti kuantum yang selesai atau mengesan graviton.
- Kajian ini **tidak** menunjukkan bahawa k-suhu negatif adalah bacaan termometer negatif biasa.

# Sejauh mana kukuhnya hasil?

Ini adalah kajian teoretikal yang disemak rakan sebaya, sehingga "bukti" mempunyai makna berbeza daripada eksperimen. Persoalan yang tepat adalah adakah definisinya koheren, adakah derivasi mengikuti dengan benar, dan adakah pendekatannya dinyatakan serta dikendalikan.

Pada tahap itu, kajian menyediakan kamus termodinamik konkrit untuk GfE dan menurunkan struktur hukum pertama, bukan sekadar bergantung pada analogi. Kajian juga menyatakan had penghampirannya dengan jelas: penyelesaian Friedmann dipinjam dari relativiti umum, dimasukkan ke dalam kuantiti GfE, dan dihadkan pada rejim di mana metrik terinduksi tetap bertingkah laku baik.

Dakwaan fizikal yang lebih besar masih terbuka. Rangka kerja ini masih baru, kajian ini tidak membandingkan kosmologinya dengan data, dan beberapa implikasinya yang paling menarik—kuantisasi, dinamik geometri sentuhan, dan kemungkinan sinaran graviton—disajikan sebagai arah kerja masa depan. Konsistensi dalaman diperlukan bagi teori graviti baru. Itu belum cukup untuk menunjukkan bahawa teori tersebut menggambarkan alam.

# Mengapa ini penting

Hubungan antara graviti dan termodinamik telah lama dan mendalam, daripada entropi lubang hitam hingga suhu ruang de Sitter. Banyak hasil tersebut diorganisasi di sekitar ufuk. GfE mencuba pendekatan berbeza: membina saiz maklumat setempat dan volumetrik langsung dari hubungan antara bahan dan geometri.

Adakah cadangan itu akan bertahan masih merupakan persoalan terbuka. Namun analisis termodinamik ini menunjukkan satu sasaran berguna bagi teori seperti itu: teori perlu menerangkan

bagaimana struktur setempat dan ketumpatan entropi setempat yang menurun dapat hidup bersebelahan dengan entropi keseluruhan yang meningkat di alam semesta yang mengembang.

Kajian ini menunjukkan satu cara yang jelas secara matematik agar perkara itu dapat berlaku. Nilainya bukan kerana ia menutup masalah graviti-entropi. Nilainya adalah kerana ia mengubah sebahagian masalah tersebut menjadi persamaan yang andaian, had, dan ujian seterusnya dapat dinyatakan dengan jelas.

# Ringkasan utama

Bianconi menurunkan huraian termodinamik di dalam Gravity From Entropy, sebuah rangka kerja graviti terubah suai yang dicadangkan dan didasarkan pada entropi relatif kuantum geometri. Pemboleh ubah entropi, tenaga, suhu, dan tekanan setempat model memenuhi hukum pertama. Ketika kuantiti GfE lengkap dinilai pada pendekatan Friedmann berenergi rendah dan berkelengkungan kecil, ketumpatan entropi dan tenaga setempat turun ketika alam semesta mengembang, sementara entropi keseluruhan naik kerana isipadu ruang-masa tumbuh; tenaga keseluruhan menghampiri pemalar pada tertib terdepan untuk contoh yang didominasi bahan dan sinaran. Sebuah berlian sebab-akibat de Sitter menghasilkan entropi yang berskala sebagai $H^{-2}$, tetapi suhu modelnya berbeza daripada suhu ufuk piawai. Ini adalah hasil matematik bersyarat di dalam GfE, bukan bukti pemerhatian bahawa graviti berasal daripada entropi, pengukuran tenaga gelap, atau teori graviti 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