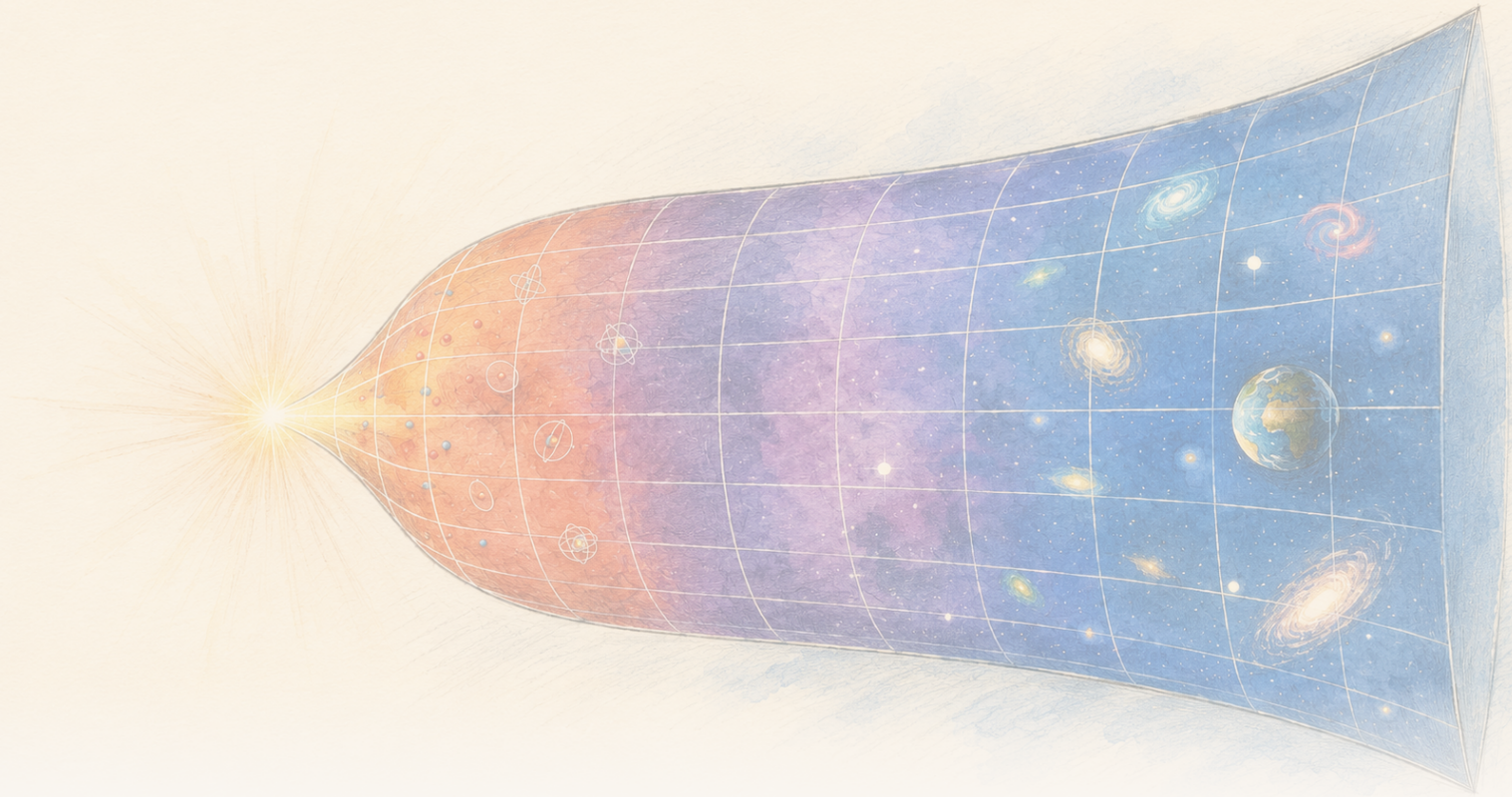

The Clean Paper

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

Bên trong một mô hình hấp dẫn dựa trên entropy, mật độ entropy cục bộ giảm trong khi tổng entropy tăng

Một bài báo Physical Review D suy ra nhiệt độ, áp suất và định luật thứ nhất bên trong Gravity From Entropy, một khung hấp dẫn sửa đổi được đề xuất. Trong xấp xỉ Friedmann thời gian muộn, độ cong thấp, mật độ entropy và năng lượng cục bộ của mô hình giảm trong khi giãn nở làm tổng entropy tăng. Phép tính cụ thể về nội bộ nhưng có điều kiện: các vũ trụ Friedmann không phải nghiệm chính xác của toàn bộ lý thuyết, và đây không phải bằng chứng quan sát rằng hấp dẫn đến từ entropy, lời giải thích cho dark energy đo được hay một lý thuyết hấp dẫn lượng tử hoàn chỉnh.

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

Thể tích tăng có thể làm mật độ giảm trong khi tổng lượng vẫn tăng

Nếu mật độ entropy trong mô hình này giảm khi vũ trụ giãn nở, làm sao tổng entropy vẫn có thể tăng?

Hãy hình dung một vũ trụ đang giãn nở được chia thành vô số ô nhỏ. Lượng của một đại lượng trong mỗi ô có thể giảm ngay cả khi tổng lượng trên toàn vùng đang lớn lên lại tăng. Mật độ giảm và tổng lượng tăng không phải hai điều đối lập khi chính thể tích cũng đang thay đổi.

Bài toán cân đối đơn giản ấy là điểm khởi đầu của một lý thuyết tham vọng hơn nhiều. Trong Physical Review D, nhà vật lý toán Ginestra Bianconi phát triển một mô tả nhiệt động lực học cho **Gravity From Entropy** (GfE), một mô hình mới được đề xuất trong đó hấp dẫn được mã hóa qua một quan hệ lý thuyết thông tin giữa vật chất và hình học. Ở đây, "lý thuyết thông tin" nghĩa là mô hình bắt đầu từ một thước đo toán học về mức độ khác nhau giữa hai mô tả hình học: hình học vật lý và một hình học được vật chất cùng độ cong cảm sinh.

Bài báo suy ra các đại lượng cục bộ gọi là k-entropy, k-năng lượng, k-nhiệt độ và k-áp suất. Tiền tố k phân biệt các sector hình học khác nhau trong mô hình; chúng không phải các chất khác nhau hay các thời kỳ vũ trụ khác nhau. Quan hệ định luật thứ nhất của chúng có cùng dạng sổ sách như nhiệt động lực học: thay đổi năng lượng liên hệ với nhiệt độ nhân thay đổi entropy, trừ áp suất nhân thay đổi thể tích.

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

Sau đó bài báo tính các đại lượng này trên các vũ trụ Friedmann đang giãn nở: những vũ trụ lý tưởng hóa tiêu chuẩn, đồng nhất và đẳng hướng ở quy mô lớn. Trong chế độ năng lượng thấp, độ cong nhỏ, các ví dụ chi phối bởi vật chất và bức xạ có mật độ entropy và năng lượng cục bộ giảm, nhưng thể tích do giãn nở tăng đủ nhanh để tổng entropy tăng. Tổng năng lượng tiến tới một hằng số ở bậc dẫn đầu, nghĩa là giữ lại hạng chi phối ở thời gian lớn và bỏ các hạng tắt nhanh hơn khi thời gian tăng.

Đây là một kết quả toán học sạch. Ranh giới của nó cũng quan trọng như vậy: phép tính được thực hiện **bên trong một lý thuyết được đề xuất**, và các vũ trụ Friedmann dùng cho ví dụ cụ thể chỉ là **xấp xỉ**, không phải nghiệm chính xác của toàn bộ phương trình GfE. Các phương trình chuyển động đó xuất phát từ biến phân action GfE được đề xuất và bao gồm G-field động cùng các sector hình học bậc cao vắng mặt trong phương trình Friedmann thông thường. Bài báo không quan sát entropy tạo ra hấp dẫn, không xác định dark energy trong Vũ trụ của chúng ta và cũng không hoàn thiện một lý thuyết hấp dẫn lượng tử.

Gravity From Entropy giả định điều gì

Thuyết tương đối rộng mô tả hấp dẫn thông qua hình học không-thời gian. Vật chất nói cho không-thời gian cong như thế nào, và độ cong đó nói cho vật chất chuyển động ra sao. GfE bắt đầu từ một action được đề xuất khác: nó coi các đối tượng liên quan metric như các toán tử lượng tử và xây Lagrangian từ một **Geometric Quantum Relative Entropy** (GQRE).

> **Ba thuật ngữ trong 120 giây**
>
> Một **toán tử lượng tử** là quy tắc toán học tác dụng lên trạng thái lượng tử và đại diện cho một đại lượng hoặc phép biến đổi. GfE giả định các đối tượng liên quan metric của nó có thể được xử lý theo cách này; bài viết không yêu cầu người đọc tái dựng phép xây dựng đó.
> **Lagrangian** là một công thức toán học cô đọng cho động lực của một lý thuyết. Tích phân nó trên không-thời gian để thu được action, rồi biến phân action để suy ra các phương trình trường.
> **GQRE** là Lagrangian đặc thù của mô hình mà GfE lựa chọn. Nó điều chỉnh ý tưởng entropy tương đối lượng tử để so sánh metric vật lý với metric bậc cao do vật chất và độ cong cảm sinh. Gọi nó là entropy không biến nó thành entropy nhiệt thông thường.

Entropy tương đối thường là thước đo độ phân biệt giữa hai phân bố xác suất hoặc hai trạng thái lượng tử. Trong GfE, phép so sánh nằm giữa metric vật lý và một metric bậc cao do vật chất và độ cong cảm sinh. “Bậc cao” không có nghĩa thêm chiều không-thời gian. Nó có nghĩa mô hình đóng gói các sector hình học vô hướng, kiểu vector và kiểu bivector vào một đối tượng mở rộng. Một **G-field** động liên hệ các thành phần này và “dressing” metric dùng trong cả phần hấp dẫn lẫn phần vật chất của mô hình. Khung được xây sao cho trong giới hạn năng lượng thấp và độ cong nhỏ, action của nó giảm về action Einstein–Hilbert của thuyết tương đối rộng cộng action vật chất.

Câu cuối rất dễ bị đọc quá mức. Khôi phục phương trình Einstein trong một giới hạn là mục tiêu nhất quán cho đề xuất. Nó không cho thấy tự nhiên dùng lý thuyết lớn hơn bên ngoài giới hạn đó.

Các phương trình trường GfE còn chứa một hạng động mà khung gọi là **hạng dark-energy hiệu dụng nổi lên**. Trong bài này, Bianconi đồng nhất mật độ nội năng của mô hình với hạng đó. “Dark energy hiệu dụng” mô tả vai trò của nó trong phương trình. Nó không phải sự đồng nhất thực nghiệm với dark energy suy ra từ quan sát vũ trụ học.

> **Ba cách dùng khác nhau của từ “entropy”**
>
> **Entropy nhiệt động lực học thông thường** đếm số cấu hình vi mô có thể cho cùng một trạng thái vĩ mô. **Entropy tương đối lượng tử** đo mức độ phân biệt giữa hai trạng thái lượng tử. **GQRE** trong bài này là một cấu trúc hình học đặc thù của mô hình, lấy cảm hứng từ entropy tương đối và dùng làm Lagrangian hấp dẫn. Tên giống nhau không

> khiến các đại lượng này hoán đổi cho nhau; bài báo suy ra các liên hệ mà nó dùng bên trong GfE.

Kết quả nhiệt động lực học chính xác bên trong mô hình

Trước hết bài báo làm việc ở cấp chính khung GfE. Với mỗi bậc và loại bậc tự do hình học, đánh chỉ số bằng k, nó định nghĩa:

- một k-entropy cục bộ từ GQRE;
- một k-năng lượng cục bộ từ mật độ nội năng của mô hình;
- một k-nhiệt độ liên hợp;
- và một k-áp suất.

Các đại lượng này tuân theo một định luật thứ nhất cục bộ. Theo ký hiệu của bài,

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

Chỉ số k không phải danh sách các chất hay các thời kỳ khác nhau của Vũ trụ. Trong phép tính đồng nhất và đẳng hướng, nó gắn nhãn năm thành phần: một thành phần vô hướng; các thành phần timelike và spacelike riêng trong sector kiểu vector; cùng các thành phần time-space và space-space riêng trong sector kiểu bivector. Vô hướng không có chỉ số hướng, các thành phần kiểu vector phân biệt hướng thời gian với không gian, còn bivector được xây từ cặp hướng. Mỗi sector có thể mang nhiệt độ và áp suất riêng. k-nhiệt độ cũng có thể dương hoặc âm, tùy thành phần G-field tương ứng.

Đây không phải nhiệt độ đo bằng cách đặt nhiệt kế gần chân trời vũ trụ. Nhiệt độ trường lượng tử de Sitter tiêu chuẩn tỷ lệ với H: **nhiệt độ Gibbons–Hawking** được gán cho chân trời vũ trụ, còn **chân không Bunch–Davies** là trạng thái lượng tử bất biến de Sitter tiêu chuẩn có tương quan trường tạo ra đáp ứng nhiệt tương ứng. Bài báo phân biệt rõ cả hai với k-nhiệt độ hình học của nó, vốn tỷ lệ với H^2 trong ví dụ de Sitter. Ở đây "nhiệt độ" là biến liên hợp nhiệt động lực học suy từ định nghĩa entropy và năng lượng của mô hình.

Vì vậy đẳng thức định luật thứ nhất là một suy diễn thật, nhưng là **kết quả nội tại**: chấp nhận action và định nghĩa của GfE thì cấu trúc nhiệt động lực học này theo sau.

Vì sao phép tính Friedmann chỉ là xấp xỉ

Để biến hình thức thành ví dụ vũ trụ học, bài báo dùng không-thời gian Friedmann–Robertson–Walker (FRW) đồng nhất và đẳng hướng. “Đồng nhất” nghĩa là mô hình ở quy mô lớn có cùng tính chất trung bình tại mọi vị trí; “đẳng hướng” nghĩa là nhìn như nhau theo mọi hướng. Một hệ số tỷ lệ duy nhất mô tả khoảng cách tăng theo thời gian, vật chất được biểu diễn như chất lưu hoàn hảo trơn, còn tham số Hubble H tóm tắt tốc độ giãn nở. Đây là nền lý tưởng hóa, không phải bản đồ của từng thiên hà.

Nhưng có một lệch cấu trúc. Các vũ trụ Friedmann giải phương trình Einstein. Nói chung chúng không giải toàn bộ phương trình GfE bậc cao, vốn còn theo dõi các sector vô hướng, kiểu vector, kiểu bivector và đạo hàm của G-field. Phương trình Einstein chỉ xuất hiện trở lại trong giới hạn bậc nhất, năng lượng thấp và độ cong nhỏ của đề xuất.

Bài báo nói thẳng điều này và dùng nghiệm Friedmann như các xấp xỉ, theo cách được so sánh với việc đưa một nghiệm trường trung bình vào một lý thuyết đầy đủ hơn để kiểm tra nơi xấp xỉ còn đáng tin. Chế độ yêu cầu năng lượng thấp và độ cong nhỏ, tóm tắt bằng $l_P H \ll 1$, với l_P là độ dài Planck. Một điều kiện thứ hai yêu cầu tích của metric bậc cao cảm sinh và nghịch đảo metric bậc cao vật lý vẫn xác định dương.

Vì vậy kết quả không phải “GfE dự đoán lịch sử Vũ trụ của chúng ta”. Nó gần hơn với: **nếu một vũ trụ GfE được xấp xỉ đủ tốt bởi vũ trụ Friedmann quen thuộc, đây là các quy luật nhiệt động lực học mà những đại lượng GfE đầy đủ tạo ra.**

Kết quả cục bộ so với tổng thể

Trong chế độ đó, các đại lượng cục bộ bậc dẫn đầu có quy luật đơn giản:

- mật độ entropy của mô hình tỷ lệ như H^2;
- mật độ năng lượng của mô hình tỷ lệ như H^4;
- với các ví dụ Friedmann không-de Sitter ở thời gian muộn, chúng xấp xỉ thành t^{-2} và t^{-4}.

Vì vậy cả hai mật độ đều giảm khi vũ trụ giãn nở. Nhưng mật độ không phải tổng lượng.

Khi bài báo tích phân trên vùng không-thời gian đang mở rộng, thể tích tăng làm thay đổi câu trả lời. Với các ví dụ quen thuộc chi phối bởi vật chất và bức xạ, tổng entropy tăng theo thời gian dù entropy trên một đơn vị thể tích giảm. Tổng năng lượng không tiếp tục tăng; ở bậc dẫn đầu nó tiến tới một hằng số.

Đây là kết quả khái niệm hữu ích nhất của bài. Trật tự cục bộ hoặc sự pha loãng không tự động mâu thuẫn với định luật thứ hai toàn cục. Một vùng có thể trở nên ít entropy hơn trên mỗi đơn vị thể tích trong khi entropy tích phân tăng, vì thể tích không-thời gian tăng nhanh hơn.

Phép tính không chứng minh đây là lời giải thích vi mô đúng cho mũi tên nhiệt động lực học

trong Vũ trụ thật. Nó cho thấy khung được đề xuất có thể chứa sự tách biệt cục bộ–toàn cục mà không mâu thuẫn trong xấp xỉ Friedmann.

So sánh de Sitter, với một nhiệt độ khác

Bài báo cũng xét không gian de Sitter, một không-thời gian lý tưởng hóa giãn nở theo hàm mũ với H không đổi. Với một quan sát viên, nó chỉ tích phân trên một **causal diamond** hữu hạn: phần giao giữa nón ánh sáng tương lai của một sự kiện sớm và nón ánh sáng quá khứ của một sự kiện muộn, giới hạn vùng không-thời gian có thể tham gia vào quan sát giữa hai thời điểm. Trên diamond đó, tổng entropy GfE tỷ lệ như H^{-2}, cùng quy luật theo H như entropy Gibbons–Hawking quen thuộc. Tổng năng lượng GfE cỡ một trong đơn vị của mô hình.

> **Một họ nền vũ trụ học**
>
> FRW là một họ hình học đồng nhất và đẳng hướng, không phải một nơi riêng. Vũ trụ chi phối bởi vật chất và chi phối bởi bức xạ là các trường hợp FRW khác nhau bởi thành phần lấp đầy mô hình. Không gian de Sitter cũng có thể viết ở dạng FRW, nhưng đại diện trường hợp chi phối bởi chân không với H không đổi và giãn nở hàm mũ. Causal diamond là một vùng hữu hạn được chọn bên trong không-thời gian đó cho một quan sát viên; nó không phải một loại vũ trụ khác.

Khớp một quy luật tỷ lệ không đồng nghĩa suy ra cùng một đối tượng vật lý. k-nhiệt độ GfE tương ứng tỷ lệ như H^2, khác nhiệt độ de Sitter chuẩn tỷ lệ như H. Bài báo diễn giải khác biệt này như dấu hiệu k-nhiệt độ thuộc về hình học không-thời gian chứ không phải các trường lượng tử sống trên nền đó.

Sau đó bài báo gợi ý nhiệt độ như vậy *có thể* liên quan bức xạ graviton thay vì phát xạ hạt thông thường. Đây là câu hỏi tương lai, không phải kết quả của bài. Trước hết lý thuyết cần được lượng tử hóa để xác lập liệu các nhiệt độ của nó có tương ứng với bức xạ hay không.

Điều nghiên cứu này không chứng minh

- Nó **không** cho thấy bằng quan sát rằng hấp dẫn nổi lên từ entropy.
- Nó **không** xác lập rằng hạng hiệu dụng của mô hình là dark energy đo được trong vũ trụ học.
- Nó **không** thay thế thuyết tương đối rộng bằng một lý thuyết vượt trội đã được kiểm nghiệm. Thuyết tương đối rộng xuất hiện ở đây như giới hạn năng lượng thấp, độ cong nhỏ của đề xuất.
- Nó **không** biến vũ trụ Friedmann thành nghiệm chính xác của GfE. Chúng là xấp xỉ dùng để ước lượng hành vi nhiệt động lực học của mô hình.

- Nó **không** suy ra một phép đếm vi mô hoàn chỉnh của các bậc tự do không-thời gian.
- Nó **không** cung cấp lý thuyết hấp dẫn lượng tử hoàn chỉnh hay phát hiện graviton.
- Nó **không** cho thấy k-nhiệt độ âm là các số âm thông thường trên nhiệt kế.

Kết quả mạnh đến đâu?

Đây là bài lý thuyết đã qua bình duyệt, nên "bằng chứng" ở đây có nghĩa khác so với thí nghiệm. Các câu hỏi phù hợp là định nghĩa có nhất quán không, suy diễn có theo logic không, và các xấp xỉ có được nêu rõ và kiểm soát không.

Ở cấp đó, bài báo đưa ra một từ điển nhiệt động lực học cụ thể cho GfE và suy ra cấu trúc định luật thứ nhất thay vì chỉ dựa trên phép tương tự. Nó cũng làm ranh giới xấp xỉ đặc biệt rõ: nghiệm Friedmann được mượn từ thuyết tương đối rộng, đưa vào các đại lượng GfE và giới hạn trong chế độ metric cảm sinh vẫn hành xử tốt.

Các tuyên bố vật lý lớn hơn vẫn mở. Khung còn mới, bài này không so vũ trụ học của nó với dữ liệu, và một số hệ quả thú vị nhất — lượng tử hóa, động lực hình học tiếp xúc và khả năng bức xạ graviton — được nêu như hướng nghiên cứu tương lai. Nhất quán nội tại là điều cần cho một lý thuyết hấp dẫn mới. Nó không đủ để cho thấy lý thuyết mô tả tự nhiên.

Vì sao nó quan trọng

Quan hệ giữa hấp dẫn và nhiệt động lực học vừa cũ vừa sâu, từ entropy hố đen đến nhiệt độ không gian de Sitter. Nhiều kết quả như vậy được tổ chức quanh chân trời. GfE thay vào đó cố xây một thước đo thông tin cục bộ, theo thể tích, trực tiếp từ quan hệ giữa vật chất và hình học.

Đề xuất có sống sót hay không vẫn là câu hỏi mở. Nhưng bài toán nhiệt động lực học này phơi ra một mục tiêu hữu ích cho bất kỳ lý thuyết như vậy: nó phải giải thích cách cấu trúc cục bộ và mật độ entropy cục bộ giảm có thể cùng tồn tại với tổng entropy tăng trong một vũ trụ giãn nở.

Bài báo cho thấy một cách toán học tường minh để điều đó xảy ra. Giá trị của nó không nằm ở việc khép lại bài toán hấp dẫn–entropy. Nó biến một phần bài toán thành các phương trình có giả định, giới hạn và phép kiểm tra tiếp theo có thể phát biểu rõ.

Tóm tắt gọn

Bianconi suy ra một mô tả nhiệt động lực học bên trong Gravity From Entropy, một khung hấp dẫn sửa đổi được đề xuất dựa trên geometric quantum relative entropy. Các biến entropy,

năng lượng, nhiệt độ và áp suất cục bộ của mô hình tuân theo một định luật thứ nhất. Khi những đại lượng GfE đầy đủ được tính trên các xấp xỉ Friedmann năng lượng thấp, độ cong nhỏ, mật độ entropy và năng lượng cục bộ giảm khi vũ trụ giãn nở, trong khi tổng entropy tăng vì thể tích không-thời gian tăng; tổng năng lượng tiến tới hằng số ở bậc dẫn đầu trong các ví dụ chi phối bởi vật chất và bức xạ. Một causal diamond de Sitter cho entropy tỷ lệ như H^{-2}, nhưng nhiệt độ mô hình khác nhiệt độ chân trời chuẩn. Đây là các kết quả toán học có điều kiện bên trong GfE, không phải bằng chứng quan sát rằng hấp dẫn đến từ entropy, phép đo dark energy hay một lý thuyết hấp dẫn lượng tử hoàn chỉnh.

Nguồn

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