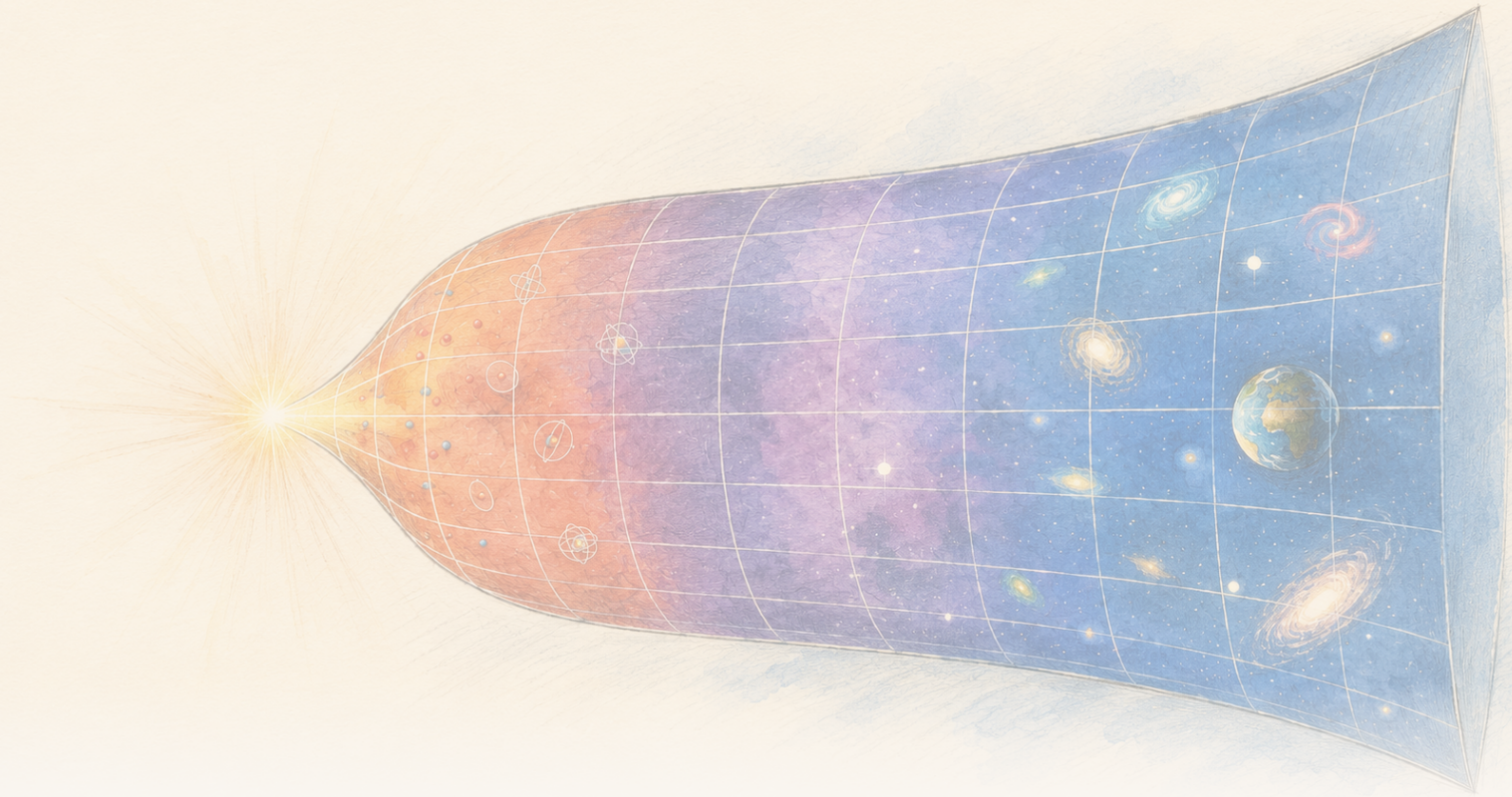

The Clean Paper

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

Dentro de um modelo de gravidade baseado em entropia, a densidade local de entropia cai enquanto o total cresce

Um artigo da Physical Review D deriva temperaturas, pressões e uma primeira lei dentro de Gravity From Entropy, uma proposta de gravidade modificada. numa aproximação de Friedmann para tempos tardios e baixa curvatura, as densidades locais de entropia e energia do modelo diminuem, enquanto a expansão faz a entropia total crescer. O cálculo é internamente concreto, mas condicional: cosmologias de Friedmann não são soluções exatas da teoria completa, e isso não é evidência observacional de que a gravidade venha da entropia, uma explicação da energia escura medida ou uma teoria concluída de gravidade quântica.

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

Um volume crescente pode reduzir uma densidade e, ao mesmo tempo, aumentar o total

Se a densidade de entropia deste modelo diminui à medida que o universo se expande, como a entropia total ainda pode aumentar?

Imagine um universo em expansão dividido em pequenas células. A quantidade de algo dentro de cada célula pode diminuir enquanto a quantidade total em toda a região em crescimento aumenta. Uma diminuição da densidade e um aumento do total não são opostos quando o próprio volume também muda.

Esta simples questão de contabilização está no centro de um artigo teórico muito mais ambicioso. Na Physical Review D, a física matemática Ginestra Bianconi desenvolve uma descrição termodinâmica de **Gravity From Entropy** — Gravidade a partir da Entropia, GfE —, um modelo proposto recentemente no qual a gravidade é codificada por uma relação baseada em teoria da informação entre matéria e geometria. Aqui, «baseada em teoria da informação» significa que o modelo parte de uma medida matemática de quanto duas descrições da geometria diferem: a geometria física e outra induzida pela matéria e pela curvatura.

O artigo deriva grandezas locais chamadas k-entropias, k-energias, k-temperaturas e k-pressões. O prefixo k distingue diferentes setores geométricos do modelo; não se trata de substâncias diferentes nem de eras cósmicas distintas. A relação de primeira lei tem a mesma estrutura formal da termodinâmica: uma variação da energia relaciona-se com a temperatura multiplicada pela variação da entropia, menos a pressão multiplicada pela variação do volume.

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

O artigo avalia depois estas grandezas em cosmologias de Friedmann em expansão: universos idealizados, homogéneos e isotrópicos em grande escala. Num regime de baixa energia e pequena curvatura, os exemplos dominados por matéria e radiação apresentam densidades locais decrescentes de entropia e energia, mas a expansão acrescenta volume suficiente para que a entropia total aumente. A energia total aproxima-se de uma constante na ordem dominante, isto é, quando se retém o termo principal a tempos tardios e se desprezam os termos que desaparecem mais depressa com a passagem do tempo.

É um resultado matemático claro. A sua fronteira é igualmente importante: o cálculo é feito **dentro de uma única teoria proposta**, e as cosmologias de Friedmann usadas nos exemplos concretos são apenas **aproximações**, não soluções exatas das equações completas de GfE. Essas equações de movimento vêm da variação da ação proposta de GfE e incluem o campo G dinâmico e setores geométricos de ordem superior ausentes das equações comuns de Friedmann. O artigo não observa diretamente que a entropia gere gravidade, não identifica a energia escura do nosso Universo e não completa uma teoria de gravidade quântica.

O que Gravity From Entropy pressupõe

A relatividade geral descreve a gravidade por meio da geometria do espaço-tempo. A matéria diz ao espaço-tempo como se curvar, e essa curvatura diz à matéria como se mover. GfE parte de uma ação proposta diferente: trata objetos relacionados à métrica como operadores quânticos e constrói sua lagrangiana a partir de uma **entropia relativa quântica geométrica** — GQRE.

Três termos em 120 segundos

Um **operador quântico** é uma regra matemática que atua sobre um estado quântico e representa uma grandeza ou transformação. GfE pressupõe que seus objetos relacionados à métrica podem ser tratados dessa forma; o artigo não exige que o leitor reproduza essa construção.

Uma **lagrangiana** é uma receita matemática compacta para a dinâmica de uma teoria. Ao integrá-la sobre o espaço-tempo, obtém-se uma ação, e ao variar essa ação derivam-se as equações de campo.

A **GQRE** é a lagrangiana específica escolhida por GfE. Ela adapta a ideia de entropia relativa quântica para comparar a métrica física com uma métrica de ordem superior induzida por matéria e curvatura. Chamá-la de entropia não a transforma em entropia térmica comum.

A entropia relativa costuma medir até que ponto duas distribuições de probabilidade ou dois estados quânticos são distinguíveis. Em GfE, a comparação é feita entre a métrica física e uma métrica de ordem superior induzida pela matéria e pela curvatura. «De ordem superior» não significa dimensões extras do espaço-tempo. Significa que o modelo agrupa setores geométricos escalares, vetoriais e bivetoriais dentro de um objeto ampliado. Um **campo G** dinâmico relaciona esses componentes e «veste» a métrica usada tanto na parte gravitacional quanto na parte material do modelo. A estrutura foi construída para que, num limite de baixa energia e pequena curvatura, a sua ação se reduza à ação de Einstein-Hilbert da relatividade geral mais a ação da matéria.

É fácil interpretar demais essa última frase. Recuperar as equações de Einstein num limite é uma meta de consistência para a proposta. Isto não demonstra que a natureza use a teoria ampliada fora desse limite.

As equações de campo de GfE também contêm um termo dinâmico que a estrutura chama de **termo efetivo emergente de energia escura**. Neste artigo, Bianconi identifica a densidade de energia interna do modelo com esse termo. «Energia escura efetiva» descreve a sua função dentro das equações. Não é uma identificação empírica com a energia escura inferida de observações cosmológicas.

Três usos diferentes da palavra «entropia»

A **entropia termodinâmica comum** conta quantas configurações microscópicas podem produzir um estado macroscópico. A **entropia relativa quântica** mede quão distinguíveis são dois estados quânticos. A **GQRE** deste artigo é uma construção geométrica específica do modelo, inspirada na entropia relativa e usada como lagrangiana gravitacional. A semelhança

> dos nomes não torna essas grandezas intercambiáveis; o artigo deriva as conexões que usa dentro de GfE.

O resultado termodinâmico exato dentro do modelo

O artigo trabalha primeiro no nível da própria estrutura GfE. Para cada ordem e tipo de grau de liberdade geométrico, indexado por k, ele define:

- uma k-entropia local a partir da GQRE;
- uma k-energia local a partir da densidade de energia interna do modelo;
- uma k-temperatura conjugada;
- e uma k-pressão.

Essas grandezas obedecem a uma primeira lei local. Na notação do artigo,

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

O índice k não é uma lista de substâncias ou épocas diferentes do Universo. No cálculo homogéneo e isotrópico, ele rotula cinco entradas: uma escalar; entradas temporais e espaciais independentes do setor vetorial; e entradas tempo-espaço e espaço-espaço independentes do setor bivetorial. Um escalar não tem índice direcional; entradas vetoriais distinguem direções temporais de espaciais; e um bivetor é construído a partir de pares de direções. Cada setor pode ter a sua própria temperatura e pressão. A k-temperatura também pode ser positiva ou negativa, dependendo do componente correspondente do campo G.

Essas não são temperaturas medidas colocando um termómetro perto de um horizonte cosmológico. A temperatura padrão da teoria quântica de campos em de Sitter escala com H: a **temperatura de Gibbons-Hawking** é atribuída ao horizonte cosmológico, enquanto o **vácuo de Bunch-Davies** é o estado quântico padrão invariante de de Sitter cujas correlações de campo produzem a resposta térmica associada. O artigo distingue explicitamente ambas das suas k-temperaturas geométricas, que escalam com H^2 no exemplo de de Sitter. Aqui, «temperatura» designa uma variável termodinâmica conjugada derivada das definições de entropia e energia do modelo.

A identidade de primeira lei é, portanto, uma derivação real, mas constitui uma **consequência interna da própria teoria**: se a ação e as definições de GfE forem aceites, esta estrutura termodinâmica decorre delas.

Porque é que o cálculo de Friedmann é uma aproximação

Para transformar o formalismo num exemplo cosmológico, o artigo usa espaços-tempo homogéneos e isotrópicos de Friedmann-Robertson-Walker — FRW. «Homogéneo» significa que o modelo em grande escala tem as mesmas propriedades médias em todos os lugares; «isotrópico» significa que parece igual em todas as direções. Um único fator de escala descreve como as distâncias crescem com o tempo, a matéria é representada como um fluido perfeito uniforme e o parâmetro de Hubble H resume a taxa de expansão. É um fundo idealizado, não um mapa de galáxias individuais.

Mas existe uma incompatibilidade estrutural. Universos de Friedmann resolvem as equações de Einstein. Em geral, não resolvem as equações completas de ordem superior de GfE, que também acompanham os setores escalar, vetorial e bivetorial e as derivadas do campo G. As equações de Einstein reaparecem apenas no limite de primeira ordem, baixa energia e pequena curvatura da proposta.

O artigo afirma-o diretamente e trata as soluções de Friedmann como aproximações, num procedimento comparável a inserir uma solução de campo médio numa teoria mais completa para verificar até onde a aproximação continua fiável. O regime exige baixa energia e pequena curvatura, resumidas por $l_P H \ll 1$, onde l_P é o comprimento de Planck. Uma segunda condição exige que o produto entre a métrica induzida de ordem superior e a inversa da métrica física de ordem superior permaneça definido positivo.

A conclusão, portanto, não é «GfE prevê a história do nosso Universo». É mais estreita: **se um universo de GfE for suficientemente bem aproximado por uma cosmologia familiar de Friedmann, estas são as leis de escala termodinâmicas produzidas pelas grandezas completas de GfE.**

O resultado local versus o total

Dentro desse regime, as grandezas locais dominantes apresentam leis de escala simples:

- a densidade de entropia do modelo escala como H^2;
- a densidade de energia do modelo escala como H^4;
- para exemplos de Friedmann que não sejam de Sitter, a tempos tardios tornam-se aproximadamente t^{-2} e t^{-4}.

Assim, ambas as densidades diminuem enquanto o universo se expande. Mas uma densidade não é o total.

Quando o artigo integra sobre a região de espaço-tempo em expansão, o volume crescente muda a resposta. Nos exemplos fisicamente familiares dominados por matéria e radiação, a entropia total aumenta com o tempo mesmo que a entropia por unidade de volume diminua. A energia total não continua a crescer; na ordem dominante, aproxima-se de uma constante.

Esse é o resultado conceitual mais útil do artigo. Ordenamento ou diluição local não entram auto-

maticamente em conflito com uma segunda lei global. Uma região pode tornar-se localmente menos entrópica por unidade de volume enquanto sua entropia integrada cresce porque o volume do espaço-tempo aumenta mais depressa.

O cálculo não demonstra que essa seja a explicação microscópica correta da seta termodinâmica no Universo real. Mostra que a estrutura proposta pode acomodar a separação entre local e global sem contradição dentro da sua aproximação de Friedmann.

Uma comparação com de Sitter, mas com uma temperatura diferente

O artigo também considera o espaço de de Sitter, um espaço-tempo idealizado em expansão exponencial com H constante. Para um único observador, ele integra apenas sobre um **diamante causal** finito: a interseção entre o cone de luz futuro de um evento anterior e o cone de luz passado de um evento posterior, delimitando a região do espaço-tempo capaz de participar de observações entre os dois. Sobre esse diamante, a entropia total de GfE escala como H^{-2}, a mesma dependência de H da conhecida entropia de Gibbons-Hawking. A energia total de GfE é de ordem um nas unidades do modelo.

> **Uma família de fundos cosmológicos**
>
> FRW é uma família de geometrias homogéneas e isotrópicas, não um lugar adicional. Universos dominados por matéria e radiação são casos de FRW diferenciados pelo que preenche o modelo. O espaço de de Sitter também pode ser escrito em forma FRW, mas representa um caso dominado pelo vácuo, com H constante e expansão exponencial. O diamante causal é uma região finita selecionada dentro desse espaço-tempo para um observador; não é outro tipo de universo.

A coincidência de uma lei de escala não equivale a derivar o mesmo objeto físico. A k-temperatura associada de GfE escala como H^2, ao contrário da temperatura padrão de de Sitter, que escala como H. O artigo interpreta essa diferença como indício de que a k-temperatura pertence à geometria do espaço-tempo, e não aos campos quânticos que vivem sobre esse fundo.

Em seguida, sugere que tal temperatura *poderia* estar associada à radiação de grávitons, em vez da emissão comum de partículas. Isso é uma questão para o futuro, não um resultado do artigo. A teoria primeiro teria de ser quantizada para estabelecer se suas temperaturas correspondem a alguma radiação.

O que isto não demonstra

- **Não** demonstra por observações que a gravidade emerja da entropia.
- **Não** estabelece que o termo efetivo do modelo seja a energia escura medida em cosmologia.
- **Não** substitui a relatividade geral por uma teoria superior testada. A relatividade geral aparece aqui como limite de baixa energia e pequena curvatura da proposta.
- **Não** transforma cosmologias de Friedmann em soluções exatas de GfE. Elas são a aproximação usada para estimar o comportamento termodinâmico do modelo.
- **Não** deriva uma contagem microscópica completa dos graus de liberdade do espaço-tempo.
- **Não** fornece uma teoria concluída de gravidade quântica nem deteta grávitons.
- **Não** demonstra que k-temperaturas negativas sejam leituras comuns negativas num termómetro.

Até que ponto é sólido o resultado?

Este é um artigo teórico revisto por pares, portanto «evidência» significa aqui algo diferente do que numa experiência. As perguntas adequadas são se as definições são coerentes, se as derivações seguem delas e se as aproximações são declaradas e controladas.

Nesse nível, o artigo fornece um dicionário termodinâmico concreto para GfE e deriva uma estrutura de primeira lei em vez de se apoiar apenas numa analogia. Também torna excecionalmente visível a fronteira da aproximação: as soluções de Friedmann são tomadas emprestadas da relatividade geral, inseridas nas grandezas de GfE e restringidas a um regime no qual a métrica induzida continua a comportar-se corretamente.

As afirmações físicas mais amplas permanecem em aberto. A estrutura é recente, este artigo não compara sua cosmologia com dados, e algumas das suas implicações mais interessantes — quantização, dinâmica de geometria de contacto e possível radiação de grávitons — são apresentadas como linhas futuras de trabalho. A consistência interna é necessária numa nova teoria gravitacional. Não basta, porém, para mostrar que a teoria descreve a natureza.

Porque é que isso importa

A relação entre gravidade e termodinâmica é antiga e profunda, desde a entropia dos buracos negros até a temperatura do espaço de de Sitter. Muitos desses resultados se organizam em torno de horizontes. GfE tenta, em vez disso, construir uma medida informacional local e volumétrica diretamente a partir da relação entre matéria e geometria.

Ainda está em aberto se a proposta sobreviverá. Mas o exercício termodinâmico expõe um alvo útil para qualquer teoria desse tipo: ela deve explicar como uma estrutura local e uma densidade local de entropia decrescente podem coexistir com uma entropia total crescente num universo em expansão.

Este artigo mostra uma forma matematicamente explícita de isso acontecer. O seu valor não está em

encerrar o problema gravidade-entropia. Transforma uma parte desse problema em equações cujas premissas, limitações e próximos testes podem ser expressos com clareza.

Resumo claro

Bianconi deriva uma descrição termodinâmica dentro de Gravity From Entropy, uma estrutura proposta de gravidade modificada baseada numa entropia relativa quântica geométrica. As variáveis locais de entropia, energia, temperatura e pressão do modelo satisfazem uma primeira lei. Quando as grandezas completas de GfE são avaliadas sobre aproximações de Friedmann de baixa energia e pequena curvatura, as densidades locais de entropia e energia diminuem enquanto o universo se expande, mas a entropia total aumenta porque o volume do espaço-tempo cresce; a energia total se aproxima de uma constante na ordem dominante nos exemplos dominados por matéria e radiação. Um diamante causal de de Sitter produz uma entropia que escala como H^{-2}, mas uma temperatura do modelo diferente da temperatura padrão do horizonte. Esses são resultados matemáticos condicionais dentro de GfE, não evidência observacional de que a gravidade venha da entropia, uma medição da energia escura ou uma teoria completa de gravidade quântica.

Fontes

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