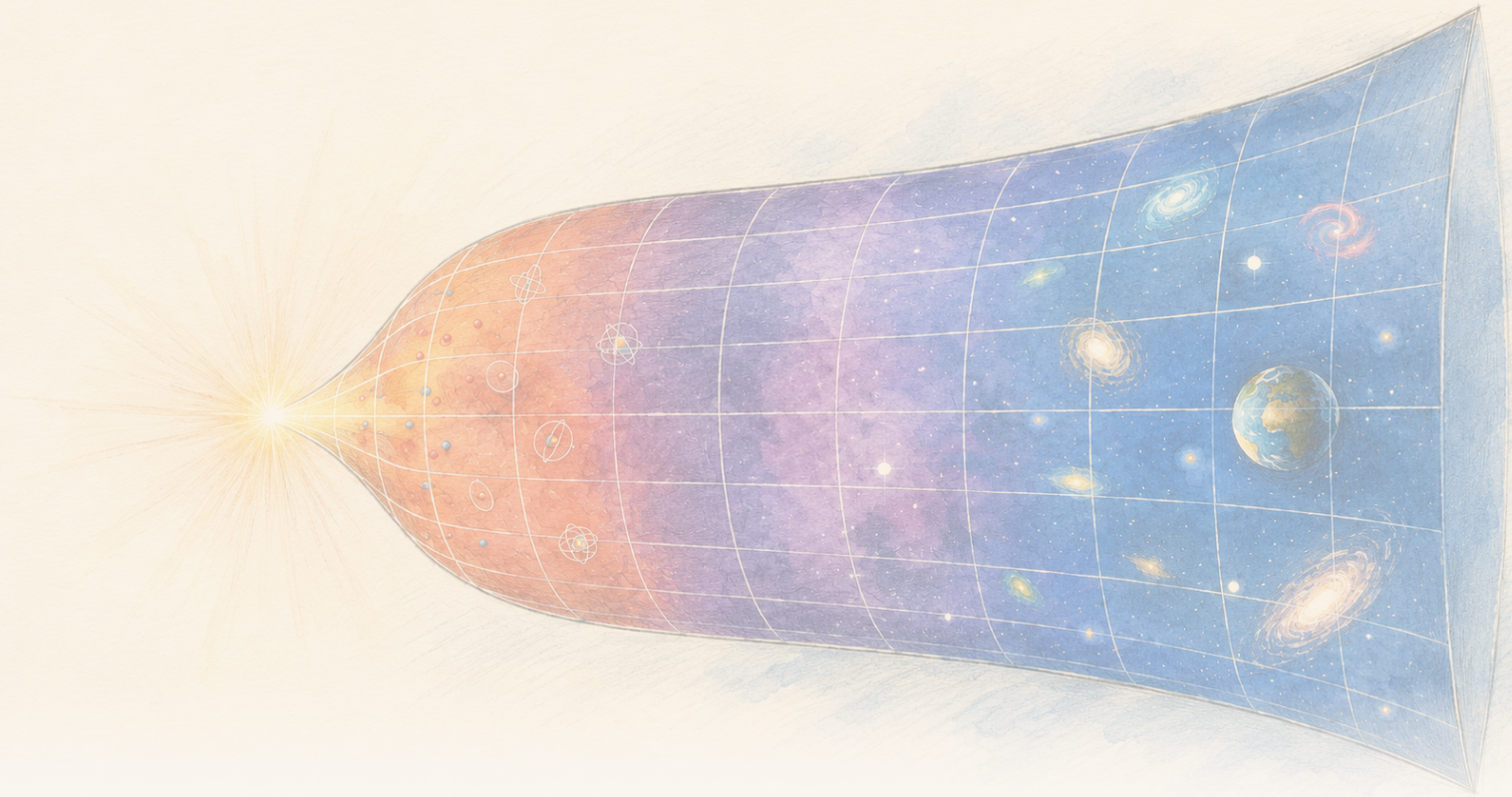

The Clean Paper

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

Brenda një modeli graviteti të bazuar në entropi, dendësia lokale e entropisë bie ndërsa totali rritet

Një punim në Physical Review D nxjerr temperatura, presione dhe një ligj të parë brenda Gravity From Entropy, një kuadër i propozuar i gravitetit të modifikuar. Në një përafrim Friedmann të kohëve të vona, me lakim të ulët, dendësitë lokale të entropisë dhe energjisë së modelit bien ndërsa zgjerimi bën që entropia totale të rritet. Llogaritja është konkrete nga brenda, por e kushtëzuar: kozmologjitë Friedmann nuk janë zgjidhje të sakta të teorisë së plotë dhe kjo nuk është provë vëzhguese se graviteti vjen nga entropia, shpjegim i energjisë së errët të matur ose një teori e përfunduar e gravitetit kuantik.

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

Një vëllim në rritje mund ta ulë dendësinë ndërsa rrit totalin

Nëse dendësia e entropisë së këtij modeli bie ndërsa universi zgjerohet, si mund të vazhdojë të rritet entropia totale?

Imagjinoni një univers në zgjerim të ndarë në qeliza të vogla. Sasia e diçkaje në secilën qelizë mund të bjerë edhe ndërsa sasia totale në gjithë rajonin që po zmadhohet rritet. Rënia e dendësisë dhe rritja e totalit nuk janë të kundërta kur vetë vëllimi po ndryshon.

Ky problem elementar kontabiliteti ndodhet në zemër të një punimi teorik shumë më ambicioz. Në Physical Review D, fizikantja matematikore Ginestra Bianconi zhvillon një përshkrim termodinamik të **Gravity From Entropy** (GfE), një model i propozuar së fundmi ku graviteti kodifikohet përmes një marrëdhënieje të teorisë së informacionit mes materies dhe gjeometrisë. Këtu "e teorisë së informacionit" do të thotë se modeli nis nga një masë matematikore e ndryshimit mes dy përshkrimeve të gjeometrisë: gjeometrisë fizike dhe një gjeometrie të induktuar nga materia dhe lakimi.

Punimi nxjerr madhësi lokale të quajtura k-entropi, k-energji, k-temperatura dhe k-presione. Parashtesa k ndan sektorë të ndryshëm gjeometrikë në model; këto nuk janë substanca ose epoka kozmike të ndryshme. Marrëdhënia e tyre e ligjit të parë ka të njëjtën formë kontabiliteti si në termodinamikë: një ndryshim energjie lidhet me temperaturën herë ndryshimin e entropisë, minus presionin herë ndryshimin e vëllimit.

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

Më pas punimi i vlerëson këto madhësi duke përdorur kozmologji Friedmann në zgjerim: universe standarde të idealizuara që janë homogjene dhe izotrope në shkallë të madhe. Në një regjim me energji të ulët dhe lakim të vogël, shembujt e dominuar nga materia dhe rrezatimi kanë dendësi lokale entropie dhe energjie që bien, por zgjerimi siguron mjaft vëllim që entropia totale të rritet. Energjia totale i afrohet një konstante në rendin kryesor, pra pasi mbahet termi dominues në kohë të gjata dhe lihen termat që zbehen më shpejt ndërsa koha rritet.

Ky është një rezultat matematikor i pastër. Kufiri i tij është po aq i rëndësishëm: llogaritja bëhet **brenda një teorie të propozuar**, dhe kozmologjitë Friedmann të përdorura për shembujt konkretë janë vetëm **përafrime**, jo zgjidhje të sakta të ekuacioneve të plota GfE. Këto ekuacione të lëvizjes vijnë nga variacioni i veprimit të propozuar GfE dhe përfshijnë fushën dinamike G dhe sektorë gjeometrikë të rendit më të lartë që mungojnë në ekuacionet e zakonshme Friedmann. Punimi nuk vëzhgon entropinë duke gjeneruar gravitet, nuk identifikon energjinë e errët të Universit tonë dhe nuk përfundon një teori të gravitetit kuantik.

Çfarë supozon Gravity From Entropy

Relativiteti i përgjithshëm e përshkruan gravitetin përmes gjeometrisë së hapësirë-kohës. Materia i tregon hapësirë-kohës si të lakohet dhe ai lakim i tregon materies si të lëvizë. GfE nis nga një veprim tjetër i propozuar: i trajton objektet e lidhura me metrikën si operatorë kuantikë dhe e ndërton Lagranzhianin e vet nga një **Entropi Relative Kuantike Gjeometrike** (Geometric Quantum Relative Entropy, GQRE).

Tri terma në 120 sekonda

Një **operator kuantik** është një rregull matematikor që vepron mbi një gjendje kuantike dhe përfaqëson një madhësi ose transformim. GfE supozon se objektet e tij të lidhura me metrikën mund të trajtohen kështu; artikulli nuk i kërkon lexuesit ta rindërtojë këtë ndërtim.
Një **Lagranzhian** është një recetë e përmbledhur matematikore për dinamikën e një teorie. Integrojeni mbi hapësirë-kohën për të marrë një veprim, pastaj variacioni i atij veprimi jep ekuacionet e fushës.
GQRE është Lagranzhiani specifik i modelit i zgjedhur nga GfE. Ai përsht idenë e entropisë relative kuantike për të krahasuar metrikën fizike me një metrikë të rendit më të lartë të induktuar nga materia dhe lakimi. Fakti që quhet entropi nuk e bën entropi të zakonshme termike.

Entropia relative zakonisht është një masë e dallueshmërisë midis dy shpërndarjeve të probabilitetit ose gjendjeve kuantike. Në GfE, krahasimi bëhet mes metrikës fizike dhe një metrike të rendit më të lartë të induktuar nga materia dhe lakimi. “Rend më i lartë” nuk do të thotë dimensione shtesë të hapësirë-kohës. Do të thotë se modeli paketon sektorë gjeometrikë skalarë, të tipit vektor dhe të tipit bivektor në një objekt të zgjeruar. Një **fushë G** dinamike i lidh këto përbërës dhe “vesh” metrikën e përdorur si në pjesën gravitacionale, ashtu edhe në atë të materies. Kuadri është ndërtuar në mënyrë që, në kufirin me energji të ulët dhe lakim të vogël, veprimi i tij të reduktohet në veprimin Einstein–Hilbert të relativitetit të përgjithshëm plus veprimin e materies.

Fjalia e fundit lexohet lehtë më tepër seç duhet. Rikuperimi i ekuacioneve të Ajnshtajnit në një kufi është një objektiv koherence për propozimin. Nuk tregon se natyra përdor teorinë më të gjerë jashtë atij kufiri.

Ekuacionet e fushës GfE përmbajnë gjithashtu një term dinamik që kuadri e quan **term efektiv emergjent të energjisë së errët**. Në këtë punim, Bianconi identifikon dendësinë e energjisë së brendshme të modelit me këtë term. “Energji e errët efektive” përshkruan rolin e tij në ekuacione. Nuk është një identifikim empirik me energjinë e errët të nxjerrë nga vëzhgimet kozmologjike.

Tri përdorime të ndryshme të fjalës “entropi”

Entropia termodinamike e zakonshme numëron sa rregullime mikroskopike mund të prodhojnë një gjendje makroskopike. **Entropia relative kuantike** mat sa të dallueshme janë dy gjendje kuantike. **GQRE** në këtë punim është një ndërtim gjeometrik specifik i modelit,

> i frymëzuar nga entropia relative dhe i përdorur si Lagranzhian gravitacional. Emrat e ngjashëm nuk i bëjnë këto madhësi të këmbyeshme; punimi nxjerr lidhjet që përdor brenda GfE.

Rezultati i saktë termodinamik brenda modelit

Punimi fillimisht punon në nivelin e vetë kuadrit GfE. Për çdo rend dhe lloj shkalle gjeometrike lirie, të indeksuar me k, ai përkufizon:

- një k-entropi lokale nga GQRE;
- një k-energji lokale nga dendësia e energjisë së brendshme të modelit;
- një k-temperaturë të konjuguar;
- dhe një k-presion.

Këto madhësi i binden një ligji të parë lokal. Në shënimin e punimit,

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

Indeksi k nuk është një listë substancash ose epokash të ndryshme të Universit. Në llogaritjen homogjene dhe izotrope ai etiketon pesë hyrje: një hyrje skalare; hyrje të veçanta kohore dhe hapësinore nga sektori i tipit vektor; dhe hyrje të veçanta kohë–hapësirë dhe hapësirë–hapësirë nga sektori i tipit bivektor. Një skalar nuk ka indeks drejtimi, hyrjet e tipit vektor dallojnë drejtimet kohore nga ato hapësinore, ndërsa një bivektor ndërtohet nga çifte drejtimesh. Çdo sektor mund të mbartë temperaturën dhe presionin e vet. K-temperatura mund të jetë gjithashtu pozitive ose negative, në varësi të përbërësit përkatës të fushës G.

Këto nuk janë temperatura të matura duke vendosur një termometër pranë një horizonti kozmologjik. Temperatura standarde kuantike e fushës në de Sitter shkallëzohet me H: **temperatura Gibbons–Hawking** i caktohet horizontit kozmologjik, ndërsa **vakuumi Bunch–Davies** është gjendja kuantike standarde invariante e de Sitter, korrelacionet e fushës së së cilës japin përgjigjen termike përkatëse. Punimi i dallon shprehimisht të dyja nga k-temperaturat e tij gjeometrike, të cilat shkallëzohen me H^2 në shembullin de Sitter. Këtu "temperaturë" emërton një ndryshore termodinamike të konjuguar, të nxjerrë nga përkufizimet e entropisë dhe energjisë së modelit.

Pra identiteti i ligjit të parë është një derivim real, por është një **rezultat i brendshëm**: pranoni veprimin dhe përkufizimet e GfE dhe kjo strukturë termodinamike vijon.

Pse llogaritja Friedmann është një përafrim

Për ta kthyer formalizmin në një shembull kozmologjik, punimi përdor hapësirë-koha Friedmann–Robertson–Walker (FRW) homogjene dhe izotrope. "Homogjene" do të thotë se modeli në shkallë të madhe ka të njëjtat veti mesatare në çdo vend; "izotrope" do të thotë se duket njësoj në çdo drejtim. Një faktor shkalle i vetëm përshkruan si rriten distancat me kohën, materia përfaqësohet si një fluid i përsosur i lëmuar dhe parametri Hubble H përmbledh ritmin e zgjerimit. Ky është një sfond i idealizuar, jo një hartë e galaktikave individuale.

Por ka një mospërputhje strukturore. Universet Friedmann zgjidhin ekuacionet e Ajnshtajnit. Në përgjithësi, ato nuk zgjidhin ekuacionet e plota të rendit më të lartë GfE, të cilat ndjekin gjithashtu sektorët skalarë, të tipit vektor dhe të tipit bivektor, si dhe derivatet e fushës G. Ekuacionet e Ajnshtajnit rishfaqen vetëm në kufirin e rendit të parë, me energji të ulët dhe lakim të vogël të propozimit.

Punimi e thotë këtë drejtpërdrejt dhe i trajton zgjidhjet Friedmann si përafrime, në një qasje të krahasuar me futjen e një zgjidhjeje të fushës mesatare në një teori më të plotë për të testuar ku mbetet i besueshëm ai përafrim. Regjimi kërkon energji të ulët dhe lakim të vogël, të përmbledhura nga $l_P H \ll 1$, ku l_P është gjatësia e Planckut. Një kusht i dytë kërkon që prodhimi i metrikës së induktuar të rendit më të lartë me inversin e metrikës fizike të rendit më të lartë të mbetet pozitivisht i përcaktuar.

Prandaj rezultati nuk është "GfE parashikon historinë e Universit tonë". Është më afër kësaj: **nëse një univers GfE përafrohet mjaft mirë nga një kozmologji e njohur Friedmann, këto janë shkallëzimet termodinamike të prodhuara nga madhësitë e plota GfE.**

Rezultati lokal kundrejt totalit

Brenda atij regjimi, madhësitë lokale kryesore kanë shkallëzime të thjeshta:

- dendësia e entropisë së modelit shkallëzohet si H^2;
- dendësia e energjisë së modelit shkallëzohet si H^4;
- për shembuj Friedmann jo-de-Sitter në kohë të vona, këto bëhen afërsisht t^{-2} dhe t^{-4}.

Prandaj të dyja dendësitë bien ndërsa universi zgjerohet. Por dendësia nuk është totali.

Kur punimi integron mbi rajonin e hapësirë-kohës në zgjerim, vëllimi në rritje e ndryshon përgjigjen. Për shembujt fizikisht të njohur të dominuar nga materia dhe rrezatimi, entropia totale rritet me kohën edhe pse entropia për njësi vëllimi bie. Energjia totale nuk vazhdon të rritet; në rendin kryesor ajo i afrohet një konstanteje.

Ky është rezultati konceptual më i dobishëm i punimit. Rendi lokal ose hollimi nuk bie automatikisht në kundërshtim me një ligj të dytë global. Një rajon mund të bëhet lokalisht më pak entropik për njësi vëllimi ndërsa entropia e integruar rritet, sepse vëllimi i hapësirë-kohës rritet më shpejt.

Llogaritja nuk provon se ky është shpjegimi mikroskopik i saktë i shigjetës termodinamike të

kohës në Universin real. Tregon se kuadri i propozuar mund ta përmbajë ndarjen lokal–global pa kundërthënie në përafrimin e tij Friedmann.

Një krahasim de Sitter, me një temperaturë tjetër

Punimi shqyrton gjithashtu hapësirën de Sitter, një hapësirë-kohë të idealizuar që zgjerohet eksponencialisht me H konstant. Për një vëzhgues të vetëm ai integron vetëm mbi një **diamant kauzal** të fundëm: mbivendosjen midis konit të dritës së ardhshme të një ngjarjeje më të hershme dhe konit të dritës së kaluar të një ngjarjeje më të vonshme, që kufizon rajonin e hapësirë-kohës që mund të marrë pjesë në vëzhgime mes tyre. Mbi atë diamant, entropia totale GfE shkallëzohet si H^{-2}, i njëjti shkallëzim me H si entropia e njohur Gibbons–Hawking. Energjia totale GfE është e rendit një në njësitë e modelit.

> **Një familje sfondesh kozmologjike**
>
> FRW është një familje gjeometrish homogjene dhe izotrope, jo një vend tjetër më vete. Universet e dominuara nga materia dhe rrezatimi janë raste FRW që dallohen nga ajo që e mbush modelin. Hapësira de Sitter mund të shkruhet gjithashtu në formë FRW, por përfaqëson një rast të dominuar nga vakuumi me H konstant dhe zgjerim eksponencial. Diamanti kauzal është një rajon i fundëm i përzgjedhur brenda asaj hapësirë-kohe për një vëzhgues; nuk është një lloj tjetër universi.

Përputhja e një shkallëzimi nuk është e njëjtë me derivimin e të njëjtit objekt fizik. K-temperatura përkatëse GfE shkallëzohet si H^2, ndryshe nga temperatura standarde de Sitter, e cila shkallëzohet si H. Punimi e interpreton këtë ndryshim si tregues se k-temperatura i përket gjeometrisë së hapësirë-kohës dhe jo fushave kuantike që jetojnë mbi atë sfond.

Më pas sugjeron se një temperaturë e tillë *mund* të lidhet me rrezatim gravitonesh në vend të emetimit të grimcave të zakonshme. Kjo është pyetje për të ardhmen, jo rezultat i këtij punimi. Teoria duhet fillimisht të kuantizohet për të vendosur nëse temperaturat e saj u korrespondojnë fare rrezatimeve.

Çfarë nuk provon kjo

- **Nuk** tregon në mënyrë vëzhguese se graviteti del nga entropia.
- **Nuk** vendos se termi efektiv i modelit është energjia e errët e matur në kozmologji.
- **Nuk** e zëvendëson relativitetin e përgjithshëm me një teori superiore të testuar. Relativiteti i përgjithshëm shfaqet këtu si kufiri me energji të ulët dhe lakim të vogël i propozimit.
- **Nuk** i bën kozmologjitë Friedmann zgjidhje të sakta të GfE. Ato janë përafrimi i përdorur për të vlerësuar sjelljen termodinamike të modelit.
- **Nuk** nxjerr një numërim të plotë mikroskopik të shkallëve të lirisë të hapësirë-kohës.

- **Nuk** jep një teori të përfunduar të gravitetit kuantik dhe nuk zbulon gravitone.
- **Nuk** tregon se k-temperaturat negative janë lexime të zakonshme negative të një termometri.

Sa i fortë është rezultati?

Ky është një punim teorik i rishikuar nga kolegët, ndaj "prova" këtu do të thotë diçka tjetër nga një eksperiment. Pyetjet e duhura janë nëse përkufizimet janë koherente, nëse derivimet vijojnë dhe nëse përafrimet deklarohen dhe kontrollohen.

Në këtë nivel, punimi jep një fjalor termodinamik konkret për GfE dhe nxjerr një strukturë ligji të parë në vend që të mbështetet vetëm në analogji. Ai gjithashtu e bën kufirin e përafrimit jashtëzakonisht të dukshëm: zgjidhjet Friedmann huazohen nga relativiteti i përgjithshëm, futen në madhësitë GfE dhe kufizohen në një regjim ku metrika e induktuar mbetet e sjellshme.

Pretendimet më të mëdha fizike mbeten të hapura. Kuadri është i ri, ky punim nuk e krahason kozmologjinë e tij me të dhënat dhe disa nga implikimet më interesante — kuantizimi, dinamika e gjeometrisë së kontaktit dhe rrezatimi i mundshëm i gravitoneve — paraqiten si drejtime për punë të ardhshme. Koherenca e brendshme është e nevojshme për një teori të re graviteti. Nuk mjafton për të treguar se teoria përshkruan natyrën.

Pse ka rëndësi

Marrëdhënia mes gravitetit dhe termodinamikës është e vjetër dhe e thellë, nga entropia e vrimave të zeza te temperatura e hapësirës de Sitter. Shumë prej këtyre rezultateve organizohen rreth horizonteve. GfE, përkundrazi, përpiqet të ndërtojë një masë lokale e vëllimore informacioni drejtpërdrejt nga marrëdhënia mes materies dhe gjeometrisë.

Nëse ky propozim do të mbijetojë mbetet pyetje e hapur. Por ushtrimi termodinamik nxjerr në pah një objektiv të dobishëm për çdo teori të tillë: duhet të shpjegojë si struktura lokale dhe rënia e dendësisë lokale të entropisë mund të bashkëjetojnë me rritjen e entropisë totale në një univers në zgjerim.

Ky punim tregon një mënyrë matematikisht të qartë se si mund të ndodhë kjo. Vlera e tij nuk është se mbyll problemin gravitet–entropi. Ai e kthen një pjesë të atij problemi në ekuacione, supozimet, kufijtë dhe testet e ardhshme të të cilave mund të shprehen qartë.

Përmbledhje e shkurtër

Bianconi nxjerr një përshkrim termodinamik brenda Gravity From Entropy, një kuadër i propozuar i gravitetit të modifikuar i bazuar në një entropi relative kuantike gjeometrike. Ndryshoret lokale të

entropisë, energjisë, temperaturës dhe presionit të modelit i binden një ligji të parë. Kur madhësitë e plota GfE vlerësohen mbi përafrime Friedmann me energji të ulët dhe lakim të vogël, dendësitë lokale të entropisë dhe energjisë bien ndërsa universi zgjerohet, ndërsa entropia totale rritet sepse vëllimi i hapësirë-kohës zmadhohet; energjia totale i afrohet një konstanteje në rendin kryesor për shembujt e dominuar nga materia dhe rrezatimi. Një diamant kauzal de Sitter jep entropi që shkallëzohet si H^{-2}, por një temperaturë modeli të ndryshme nga temperatura standarde e horizontit. Këto janë rezultate matematikore të kushtëzuara brenda GfE, jo prova vëzhguese se graviteti vjen nga entropia, matje e energjisë së errët ose një teori e përfunduar e gravitetit kuantik.

Burimet

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