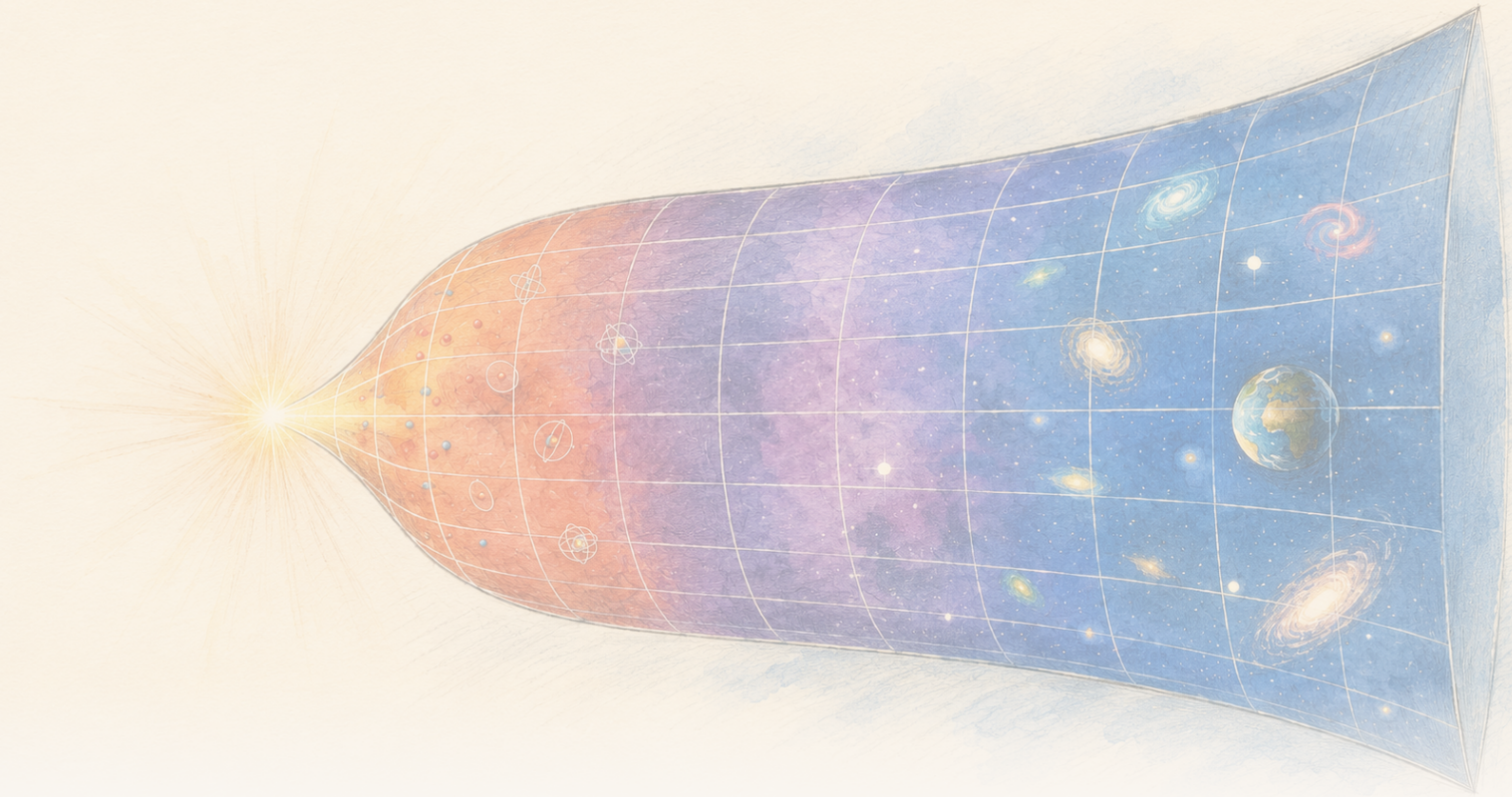

The Clean Paper

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

Í þyngdarlíkani byggðu á óreiðu minnkar staðbundinn óreiðuþéttleiki á meðan heildin vex

Grein í Physical Review D leiðir út hitastig, þrýsting og fyrsta lögmál innan Gravity From Entropy, fyrirhugaðs breytts þyngdarramma. Í seintíma, lítilli-sveigju Friedmann-nálgun minnka staðbundnir óreiðu- og orkuþéttleikar líkansins á meðan útþenslan lætur heildaróreiðu vaxa. Útreikningurinn er innbyrðis áþreifanlegur en skilyrtur: Friedmann-heimsfræði er ekki nákvæm lausn fullu kenningarinnar og þetta eru ekki athugunargögn um að þyngdarafl komi frá óreiðu, skýring á mældri huldorku eða fullgerð skammtaþyngdarkenning.

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

Vaxandi rúmmál getur lækkað þéttleika á sama tíma og heildarmagnið eykst

Ef óreiðuþéttleiki þessa líkans minnkar þegar alheimur þenst út, hvernig getur heildaróreiðan samt aukist?

Ímyndið ykkur þenjandi alheim skipt niður í örsmáar frumur. Magn einhvers í hverri frumu getur minnkað á sama tíma og heildarmagnið yfir hið stækkandi svæði eykst. Minnkandi þéttleiki og vaxandi heild eru ekki andstæður þegar rúmmálið sjálft breytist.

Þessi einfaldi talningarvandi liggur að baki mun metnaðarfyllri fræðilegri grein. Í Physical Review D þróar stærðfræðieðlisfræðingurinn Ginestra Bianconi varmafræðilega lýsingu á **Gravity From Entropy** (GfE), nýlegu líkani þar sem þyngdarafl er sett fram með upplýsingafræðilegu sambandi milli efnis og rúmfræði. Hér merkir „upplýsingafræðilegt“ að líkanið byrjar á stærðfræðilegum mælikvarða á mun milli tveggja lýsinga á rúmfræði: raunverulegu rúmfræðinnar og rúmfræði sem efni og sveigja kalla fram.

Greinin leiðir út staðbundnar stærðir sem kallast k-óreiður, k-orkur, k-hitastig og k-þrýstingur. Forskeytið k aðskilur ólíka rúmfræðilega geira líkansins; þetta eru ekki mismunandi efni eða skeið í sögu alheimsins. Samband þeirra, sem minnir á fyrsta lögmál varmafræðinnar, hefur sama stærðfræðilega form: breyting á orku tengist hitastigi sinnum breytingu á óreiðu, að frádregnum þrýstingi sinnum breytingu á rúmmáli.

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

Greinin metur síðan þessar stærðir með þenjandi Friedmann-heimsfræði: stöðluðum hugsjónalíkönum af alheimi sem er einsleitur og stefnusamhverfur á stórum kvarða. Í lágorku- og lítillisveigju ástandi hafa dæmin með efnis- og geislunarráðandi alheimum minnkandi staðbundinn óreiðu- og orkuþéttleika, en útþenslan gefur svo mikið aukið rúmmál að heildaróreiðan eykst. Heildarorkan nálgast fasta tölu í fremstu röð, það er þegar ráðandi langtímalið er haldið en liðum sem hverfa hraðar með tíma er sleppt.

Þetta er skýr stærðfræðileg niðurstaða. Mörk hennar eru jafn mikilvæg: útreikningurinn fer fram **innan einnar fyrirhugaðrar kenningar** og Friedmann-heimsfræðin sem notuð er í dæmunum er aðeins **nálgun**, ekki nákvæm lausn á fullum GfE-jöfnum. Þær hreyfijöfnur koma frá breytun hins fyrirhugaða GfE-virkni og innihalda kvika G-sviðið og hærri-röðu rúmfræðigeira sem vantar í venjulegar Friedmann-jöfnur. Greinin fylgist ekki með óreiðu skapa þyngdarafl, auðkennir ekki huldorku alheimsins okkar og lýkur ekki kenningu um skammtaþyngdarfræði.

Hvað Gravity From Entropy gerir ráð fyrir

Almenn afstæðiskenning lýsir þyngdarafli með rúmfræði tímarúms. Efni segir tímarúmi hvernig það eigi að sveigjast og sveigjan segir efni hvernig það hreyfist. GfE byrjar með annarri fyrirhugaðri

virkni: það meðhöndlar metríktengda hluti sem skammtavirka og byggir Lagrange-fall sitt á **Geometric Quantum Relative Entropy** (GQRE), rúmfræðilegri skammta-afstæðri óreiðu.

Þrjú hugtök á 120 sekúndum

Skammtavirki er stærðfræðileg regla sem verkar á skammtaástand og táknar stærð eða umbreytingu. GfE gerir ráð fyrir að metríktengda hluti þess megi meðhöndla þannig; greinin biður lesandann ekki að endurgera þá smíð.
Lagrange-fall er þétt stærðfræðileg uppskrift að hreyfifræði kenningar. Það er heildað yfir tímarúm til að fá virkni og síðan er virkninni breytt til að leiða út sviðsjöfnurnar.
GQRE er líkanbundna Lagrange-fallið sem GfE velur. Það aðlagar hugmyndina um skammta-afstæða óreiðu til að bera saman raunverulegu metríkina og hærri-röðu metrík sem efni og sveigja kalla fram. Að kalla þetta óreiðu gerir hana ekki að venjulegri varmaóreiðu.

Afstæð óreiða er venjulega mælikvarði á greinanleika tveggja líkindadreifinga eða skammtaástanda. Í GfE er samanburðurinn milli raunverulegu metríkarinnar og hærri-röðu metríkar sem efni og sveigja kalla fram. „Hærri röð“ þýðir ekki fleiri víddir tímarúms. Það þýðir að líkanið pakkar skalar-, vigur- og tvívigur-líkum rúmfræðigeirum saman í einn stækkaðan hlut. Kvikt **G-svið** tengir þessa þætti og „klæðir“ metríkina sem notuð er bæði í þyngdar- og efnishluta líkansins. Ramminn er smíðaður þannig að í lágorku- og lítilli-sveigju mörkum færist virkni hans yfir í Einstein–Hilbert-virkni almennrar afstæðiskenningar auk efnisvirkninnar.

Síðasta setningin er auðlesin of stórt. Að endurheimta Einstein-jöfnurnar í ákveðnum mörkum er samkvæmnimarkmið fyrir tillöguna. Það sýnir ekki að náttúran noti stærri kenninguna utan þeirra marka.

GfE-sviðsjöfnurnar innihalda einnig kvikan lið sem ramminn kallar **framkominn virkan huldorkulið**. Í þessari grein samsamar Bianconi innri orkuþéttleika líkansins þeim lið. „Virk huldorka“ lýsir hlutverki hans í jöfnunum. Það er ekki reynsluleg samsömun við þá huldorku sem ályktað er um úr heimsfræðilegum athugunum.

Þrjár mismunandi merkingar orðsins „óreiða“

Venjuleg varmafræðileg óreiða telur hve margar smásæjar uppröðanir geta gefið sama stórsæja ástand. **Skammta-afstæð óreiða** mælir hve greinanleg tvö skammtaástand eru. **GQRE** í þessari grein er líkanbundin rúmfræðileg smíð innblásin af afstæðri óreiðu og notuð sem Lagrange-fall þyngdaraflsins. Svipuð heiti gera þessar stærðir ekki skiptanlegar; greinin leiðir út tengslin sem hún notar innan GfE.

Nákvæma varmafræðilega niðurstaðan innan líkansins

Greinin vinnur fyrst á stigi GfE-rammans sjálfs. Fyrir hverja röð og tegund rúmfræðilegrar frelsisgráðu, merkt með k, skilgreinir hún:

- staðbundna k-óreiðu úr GQRE;
- staðbundna k-orku úr innri orkuþéttleika líkansins;
- samsvarandi k-hitastig;
- og k-þrýsting.

Þessar stærðir uppfylla staðbundið fyrsta lögmál. Í táknun greinarinnar,

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

Vísirinn k er ekki listi yfir mismunandi efni eða tímabil alheimsins. Í einsleita og stefnusamhverfa útreikningnum merkir hann fimm færslur: eina skalarfærslu; aðskildar tíma- og rúmlíkar færslur úr vigurlíka geiranum; og aðskildar tíma–rúm og rúm–rúm færslur úr tvívigurlíka geiranum. Skalari hefur engan stefnuvísi, vigurlíku færslurnar skilja tímalega átt frá rúmlegri og tvívigur er byggður úr pörum átta. Hver geiri getur haft sitt eigið hitastig og þrýsting. k-hitastigið getur einnig verið jákvætt eða neikvætt eftir samsvarandi þætti G-sviðsins.

Þetta eru ekki hitastig sem mælast með hitamæli við heimsfræðilegan sjóndeildarhring. Staðlaða de Sitter-hitastig skammtasviðsfræði skalar með H: **Gibbons–Hawking-hitastigið** er úthlutað heimsfræðilega sjóndeildarhringnum, en **Bunch–Davies-tómið** er staðlaða de Sitter-óbreytta skammtaástandið sem sviðsfylgni gefur tilheyrandi varmasvörun. Greinin aðskilur hvort tveggja beinlínis frá rúmfræðilegu k-hitastigunum, sem skala með H^2 í de Sitter-dæminu. Hér er „hitastig“ nafn á varmafræðilegri samfallstærð sem er leidd út frá skilgreiningum líkansins á óreiðu og orku.

Sambandið sem líkist fyrsta lögmálinu er því raunveruleg afleiðsla, en aðeins **innan líkansins**: ef GfE-virknin og skilgreiningarnar eru samþykktar fylgir þessi varmafræðilega bygging.

Hvers vegna Friedmann-útreikningurinn er nálgun

Til að breyta formalismanum í heimsfræðilegt dæmi notar greinin einsleit og stefnusamhverf Friedmann–Robertson–Walker (FRW) tímarúm. „Einsleitt“ þýðir að stórkvarðalíkanið hefur sömu meðaleiginleika alls staðar; „stefnusamhverft“ að það lítur eins út í allar áttir. Einn skalaþáttur lýsir því hvernig vegalengdir vaxa með tíma, efni er táknað sem sléttur fullkominn vökvi og Hubble-breytan H dregur saman útþensluhraðann. Þetta er hugsjónabakgrunnur, ekki kort af einstökum vetrarbrautum.

En byggingarlegt ósamræmi er til staðar. Friedmann-alheimar leysa Einstein-jöfnur. Þeir leysa almennt ekki fullu hærri-röðu GfE-jöfnurnar, sem fylgjast einnig með skalar-, vigurlíkum og tvívigurlíkum geirum og afleiðum G-sviðsins. Einstein-jöfnurnar koma aftur aðeins í fyrstu-röðu, lágorku- og lítilli-sveigju mörkum tillögunnar.

Greinin segir þetta beint og meðhöndlar Friedmann-lausnir sem nálganir, í aðferð sem borin er saman við að setja meðalsviðslausn inn í fyllri kenningu til að kanna hvar nálgunin er áreiðanleg. Ástandið krefst lítillar orku og lítillar sveigju, dregið saman með $l_P H \ll 1$, þar sem l_P er Plancklengdin. Annað skilyrði krefst þess að margfeldi hinnar framkölluðu hærri-röðu metríkar og and-

hverfu raunverulegu hærri-röðu metríkarinnar haldist jákvætt ákveðið.

Niðurstaðan er því ekki sú að „GfE spái fyrir um sögu alheimsins okkar“. Réttara er að segja: **ef GfE-alheimur er nægilega vel nálgaður með kunnuglegri Friedmann-heimsfræði, þá eru þetta varmafræðilegu skölunin sem fullu GfE-stærðirnar gefa.**

Staðbundna á móti heildarniðurstöðunni

Innan þessara marka hafa ráðandi staðbundnu stærðirnar einföld skölunarlögmál:

- óreiðuþéttleiki líkansins skalar sem H^2;
- orkuþéttleiki líkansins skalar sem H^4;
- í öðrum Friedmann-dæmum en de Sitter seint í tíma verða þau um það bil t^{-2} og t^{-4}.

Báðir þéttleikar minnka því þegar alheimurinn þenst út. En þéttleiki er ekki heildarmagn.

Þegar greinin heildar yfir hið stækkandi tímarúmssvæði breytir vaxandi rúmmálið niðurstöðunni. Í kunnuglegu dæmunum með efnis- og geislunarráðandi alheimum eykst heildaróreiða með tíma þótt óreiða á rúmmálseiningu minnki. Heildarorkan heldur ekki áfram að vaxa; í fremstu röð nálgast hún fasta tölu.

Þetta er gagnlegasta hugmyndalega niðurstaða greinarinnar. Staðbundin röðun eða þynning stangast ekki sjálfkrafa á við alþjóðlegt annað lögmál. Svæði getur orðið staðbundið minna óreiðuríkt á rúmmálseiningu á sama tíma og heildaða óreiðan vex, því tímarúmsrúmmálið vex hraðar.

Útreikningurinn sannar ekki að þetta sé rétta smásæja skýringin á varmafræðilegri tímaör í raunverulegum alheimi. Hann sýnir að fyrirhugaði ramminn getur rúmað muninn milli staðbundins og heildar án mótsagnar í Friedmann-nálgun sinni.

De Sitter-samanburður með öðru hitastigi

Greinin skoðar einnig de Sitter-rúm, hugsjónalegt veldisvaxandi tímarúm með föstu H. Fyrir einn athuganda heildar hún aðeins yfir endanlegan **orsakademant** (*causal diamond*): skörun framtíðarljóskeilu fyrri atburðar og fortíðarljóskeilu seinni atburðar, sem afmarkar það tímarúmssvæði sem getur tekið þátt í athugunum milli þeirra. Yfir þann demant skalar heildar-GfE-óreiða sem H^{-2}, sama H-skölun og kunnugleg Gibbons–Hawking-óreiða. Heildar-GfE-orkan er af stærðargráðu einn í einingum líkansins.

> **Ein fjölskylda heimsfræðilegra bakgrunna**

> FRW er fjölskylda einsleitra og stefnusamhverfra rúmfræði, ekki einn aukastaður. Efnis- og geislunarráðandi alheimar eru FRW-tilfelli sem aðgreinast eftir því hvað fyllir líkanið. De Sitter-rúm má einnig skrifa á FRW-formi en lýsir tómarúmsráðandi tilfelli með föstu H og veldisútþenslu. Orsakademanturinn er endanlegt svæði valið inni í því tímarúmi fyrir einn athuganda; hann er ekki önnur tegund alheims.

Samsvarandi skölun er ekki það sama og að leiða út sama eðlisfræðilega hlut. Tilheyrandi GfE k-hitastig skalar sem H^2, ólíkt staðlaða de Sitter-hitastiginu sem skalar sem H. Greinin túlkar muninn sem vísbendingu um að k-hitastigið tilheyri rúmfræði tímarúms fremur en skammtasviðum sem lifa á þeim bakgrunni.

Síðan er lagt til að slíkt hitastig *gæti* tengst þyngdareindageislun fremur en venjulegri eindalosun. Það er framtíðarspurning, ekki niðurstaða greinarinnar. Fyrst þyrfti að skammta kenninguna til að staðfesta hvort hitastigin samsvari yfirhöfuð geislun.

Hvað þetta sannar ekki

- Það sýnir **ekki** með athugunum að þyngdarafl spretti úr óreiðu.
- Það staðfestir **ekki** að virki liður líkansins sé huldorkan sem mæld er í heimsfræði.
- Það **kemur ekki í stað almennrar afstæðiskenningar** sem prófuð betri kenning. Almenn afstæðiskenning birtist hér sem lágorku- og lítilli-sveigju mörk tillögunnar.
- Það gerir **ekki** Friedmann-heimsfræði að nákvæmri lausn GfE. Hún er nálgunin sem notuð er til að meta varmafræðilega hegðun líkansins.
- Það leiðir **ekki** út fullkomna smásæja talningu á frelsisgráðum tímarúms.
- Það gefur **ekki** fullbúna kenningu um skammtaþyngdarfræði og greinir ekki þyngdareindir.
- Það sýnir **ekki** að neikvæð k-hitastig séu venjulegar neikvæðar hitamælismælingar.

Hversu sterk er niðurstaðan?

Þetta er ritrýnd fræðileg grein, þannig að „gögn“ merkir hér annað en í tilraun. Réttu spurningarnar eru hvort skilgreiningarnar séu samkvæmar, hvort afleiðslurnar fylgi og hvort nálganir séu skýrt fram settar og undir stjórn.

Á þeim mælikvarða gefur greinin áþreifanlegt varmafræðilegt orðasafn fyrir GfE og leiðir út fyrstalögmáls byggingu í stað þess að byggja aðeins á hliðstæðu. Hún gerir einnig mörk nálgunarinnar óvenju sýnileg: Friedmann-lausnirnar eru fengnar að láni úr almennri afstæðiskenningu, settar inn í GfE-stærðirnar og takmarkaðar við svið þar sem framkallaða metríkin hegðar sér vel.

Stærri eðlisfræðilegu fullyrðingarnar eru áfram opnar. Ramminn er nýlegur, þessi grein ber heimsfræði hans ekki saman við gögn og sumar áhugaverðustu afleiðingarnar — skömmtun, snertirúmfræðileg hreyfifræði og möguleg þyngdareindageislun — eru kynntar sem framtíðarverkefni. Innri

samkvæmni er nauðsynleg fyrir nýja þyngdarkenningu. Hún er ekki nægileg til að sýna að kenningin lýsi náttúrunni.

Hvers vegna þetta skiptir máli

Tengsl þyngdarafls og varmafræði eru gömul og djúp, allt frá óreiðu svarthola til hitastigs de Sitter-rúms. Margar þessara niðurstaðna eru skipulagðar í kringum sjóndeildarhringi. GfE reynir þess í stað að byggja staðbundinn, rúmmálsbundinn upplýsingamælikvarða beint úr sambandi efnis og rúmfræði.

Hvort tillagan stenst er opin spurning. En varmafræðilega æfingin afhjúpar gagnlegt markmið fyrir hvaða slíka kenningu sem er: hún ætti að útskýra hvernig staðbundin bygging og minnkandi staðbundinn óreiðuþéttleiki geta farið saman við vaxandi heildaróreiðu í þenjandi alheimi.

Þessi grein sýnir eina stærðfræðilega skýra leið sem það getur gerst. Gildi hennar er ekki að hún loki þyngdarafl–óreiðu vandanum. Hún breytir hluta hans í jöfnur þar sem hægt er að segja skýrt hverjar forsendurnar, mörkin og næstu prófanirnar eru.

Í stuttu máli

Bianconi leiðir út varmafræðilega lýsingu innan Gravity From Entropy, fyrirhugaðs breytts þyngdarramma sem byggir á rúmfræðilegri skammta-afstæðri óreiðu. Staðbundnar óreiðu-, orku-, hitastigs- og þrýstistærðir líkansins uppfylla fyrsta lögmál. Þegar fullu GfE-stærðirnar eru metnar á lágorku- og lítilli-sveigju Friedmann-nálgunum minnka staðbundnir óreiðu- og orkuþéttleikar þegar alheimurinn þenst út, en heildaróreiða eykst vegna vaxandi tímarúmsrúmmáls; heildarorka nálgast fasta tölu í fremstu röð í efnis- og geislunarráðandi dæmum. De Sitter-orsakademantur gefur óreiðu sem skalar sem H^{-2}, en líkanhitastig sem er ólíkt staðlaða sjóndeildarhringshitastiginu. Þetta eru skilyrtar stærðfræðilegar niðurstöður innan GfE, ekki athugunargögn um að þyngdarafl komi frá óreiðu, mæling á huldorku eða fullgerð skammtaþyngdarkenning.

Heimildir

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