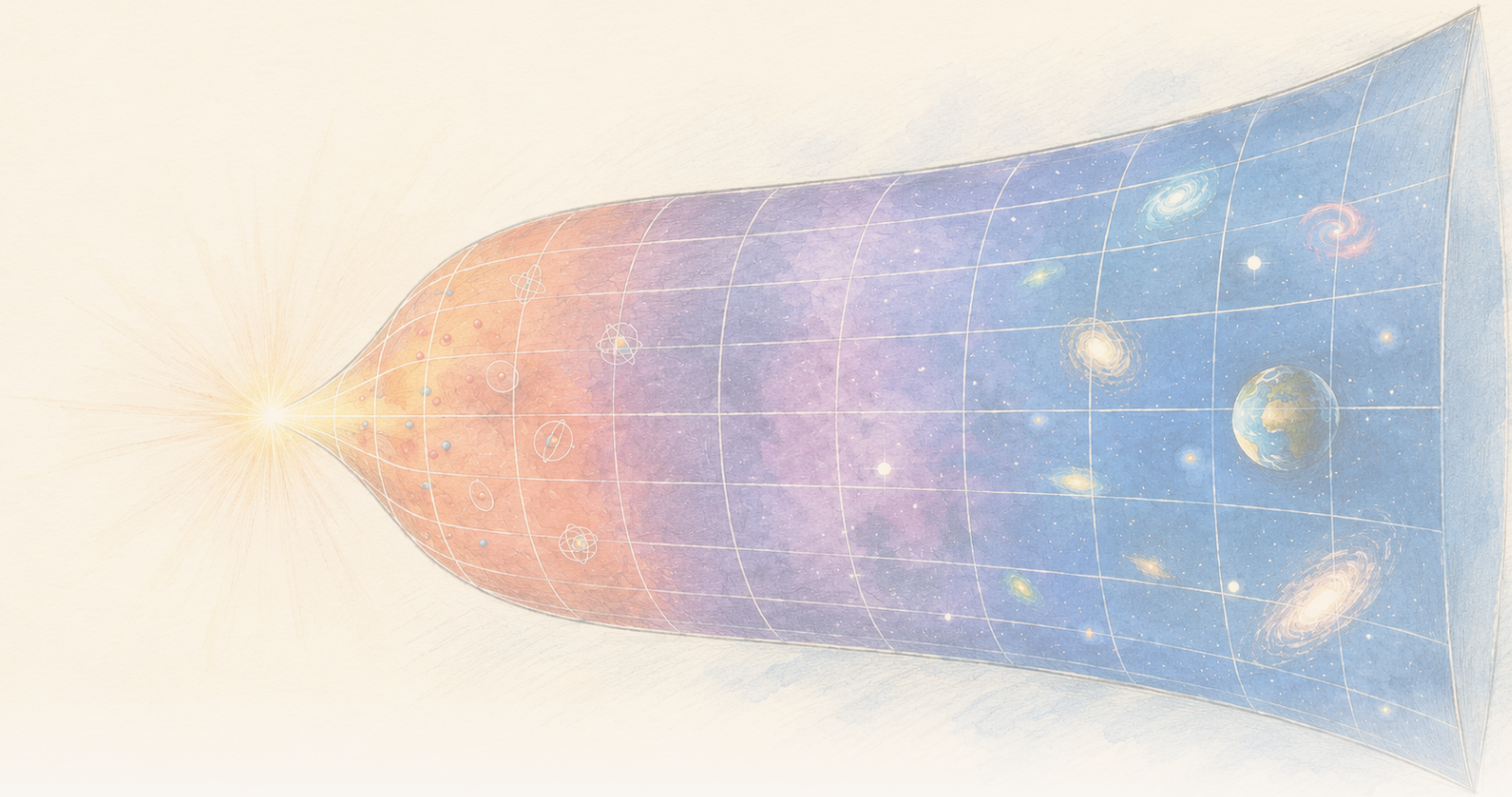

The Clean Paper

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

У мадэлі гравітацыі на аснове энтрапіі лакальная шчыльнасць энтрапіі падае, а поўная расце

Артыкул у Physical Review D выводзіць тэмпературы, ціскі і першы закон унутры Gravity From Entropy — прапанаванай мадыфікаванай тэорыі гравітацыі. У познечасавым набліжэнні Фрыдмана з малой крывізной лакальныя шчыльнасці энтрапіі і энергіі мадэлі падаюць, тады як пашырэнне прымушае поўную энтрапію расці. Вылічэнне ўнутрана канкрэтнае, але ўмоўнае: касмалогіі Фрыдмана не з'яўляюцца дакладнымі развязаннямі поўнай тэорыі, а вынік не служыць назіральным доказам паходжання гравітацыі з энтрапіі, тлумачэннем вымеранай цёмнай энергіі або завершанай тэорыяй квантавай гравітацыі.

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

Рост аб'ёму можа зніжаць шчыльнасць і адначасова павялічваць поўную колькасць

Калі ў гэтай мадэлі шчыльнасць энтрапіі падае падчас пашырэння Сусвету, як яго поўная энтрапія ўсё ж можа расці?

Уявіце Сусвет, які пашыраецца і падзелены на малыя ячэйкі. Колькасць нечага ў кожнай ячэйцы можа змяншацца, нават калі агульная колькасць ва ўсёй вобласці, што расце, павялічваецца. Зніжэнне шчыльнасці і рост поўнай колькасці не супярэчаць адно аднаму, калі змяняецца сам аб'ём.

Гэтая простая арыфметыка ляжыць у аснове значна амбіцыйнейшага тэарэтычнага артыкула. У Physical Review D матэматычная фізік Джынэстра Б'янконі развівае тэрмадынамічнае апісанне **Gravity From Entropy** (GfE, «гравітацыя з энтрапіі») — нядаўна прапанаванай мадэлі, у якой гравітацыя апісваецца праз інфармацыйна-тэарэтычнае дачыненне паміж матэрыяй і геаметрыяй. Тут «інфармацыйна-тэарэтычны» азначае, што мадэль пачынаецца з матэматычнай меры адрознення паміж двума апісаннямі геаметрыі: фізічнай геаметрыяй і геаметрыяй, індукаванай матэрыяй і крывізной.

У артыкуле выводзяцца лакальныя велічыні, названыя k-энтрапіямі, k-энергіямі, k-тэмпературамі і k-ціскамі. Прэфікс k раздзяляе розныя геаметрычныя сектары мадэлі; гэта не розныя рэчывы і не касмічныя эпохі. Іх суадносіны першага закону маюць тую ж структуру, што і ў тэрмадынаміцы: змена энергіі звязаная з тэмпературай, памножанай на змену энтрапіі, мінус ціск, памножаны на змену аб'ёму.

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

Далей артыкул вылічвае гэтыя велічыні для касмалогій Фрыдмана, якія пашыраюцца, — стандартных ідэалізаваных Сусветаў, аднародных і ізатропных у вялікіх маштабах. У нізкаэнергетычным рэжыме малой крывізны ў прыкладах, дзе дамінуюць матэрыя або выпраменьванне, лакальныя шчыльнасці энтрапіі і энергіі змяншаюцца, але пашырэнне дадае дастаткова аб'ёму, каб поўная энтрапія расла. Поўная энергія ў вядучым парадку набліжаецца да сталай — то-бок калі захаваць член, які дамінуе на вялікіх часах, і адкінуць члены, што згасаюць хутчэй.

Гэта выразны матэматычны вынік. Не менш важная яго мяжа: вылічэнне выканана **ўнутры адной прапанаванай тэорыі**, а касмалогіі Фрыдмана, выкарыстаныя для канкрэтных прыкладаў, з'яўляюцца толькі **набліжанымі**, а не дакладнымі развязаннямі поўных раўнанняў GfE. Гэтыя раўнанні руху атрымліваюць вар'іраваннем прапанаванага дзеяння GfE; яны змяшчаюць дынамічнае G-поле і геаметрычныя сектары вышэйшага парадку, адсутныя ў звычайных раўнаннях Фрыдмана. Артыкул не назірае, як энтрапія спараджае гравітацыю, не атаясамлівае цёмную энергію нашага Сусвету і не завяршае тэорыю квантавай гравітацыі.

Што дапускае Gravity From Entropy

Агульная тэорыя адноснасці апісвае гравітацыю праз геаметрыю прасторы-часу. Матэрыя паведамляе прасторы-часу, як скрыўляцца, а крывізна паведамляе матэрыі, як рухацца. GfE пачынаецца з іншага прапанаванага дзеяння: звязаныя з метрыкай аб'екты разглядаюцца як квантавыя аператары, а лагранжыян будуецца з **геаметрычнай квантавай адноснай энтрапіі** (GQRE).

Тры тэрміны за 120 секунд

Квантавы аператар — матэматычнае правіла, якое дзейнічае на квантавы стан і прадстаўляе велічыню або пераўтварэнне. GfE дапускае, што звязаныя з метрыкай аб'екты можна разглядаць такім чынам; артыкул не патрабуе ад чытача ўзнаўляць гэтую канструкцыю.

Лагранжыян — кампактны матэматычны рэцэпт дынамікі тэорыі. Яго інтэгруюць па прасторы-часе, атрымліваючы дзеянне, а потым вар'іруюць дзеянне, каб вывесці раўнанні поля.

GQRE — выбраны ў GfE спецыфічны лагранжыян мадэлі. Ён адаптуе ідэю квантавай адноснай энтрапіі для параўнання фізічнай метрыкі з метрыкай вышэйшага парадку, індукаванай матэрыяй і крывізной. Назва «энтрапія» не ператварае яго ў звычайную цеплавую энтрапію.

Адносная энтрапія звычайна вымярае адрозніўнасць двух размеркаванняў імавернасці або квантавых станаў. У GfE параўноўваюцца фізічная метрыка і метрыка вышэйшага парадку, індукаваная матэрыяй і крывізной. «Вышэйшага парадку» не азначае дадатковыя вымярэнні прасторы-часу. Гэта азначае, што мадэль аб'ядноўвае скалярныя, вектарныя і бівектарныя геаметрычныя сектары ў адзін пашыраны аб'ект. Дынамічнае **G-поле** звязвае гэтыя кампаненты і «апранае» метрыку, выкарыстаную і ў гравітацыйнай, і ў матэрыяльнай частках мадэлі. Канструкцыя ўладкаваная так, каб у нізкаэнергетычнай мяжы малой крывізны яе дзеянне пераходзіла ў дзеянне Эйнштэйна—Гільберта агульнай тэорыі адноснасці плюс дзеянне матэрыі.

Апошні сказ лёгка прачытаць занадта шырока. Аднаўленне раўнанняў Эйнштэйна ў пэўнай мяжы — праверка ўзгодненасці прапановы. Яно не паказвае, што прырода выкарыстоўвае большую тэорыю па-за гэтай мяжой.

Раўнанні поля GfE таксама змяшчаюць дынамічны член, які схема называе **эфектыўным членам цёмнай энергіі, што ўзнікае**. У гэтым артыкуле Б'янконі атаясамлівае шчыльнасць унутранай энергіі мадэлі з гэтым членам. «Эфектыўная цёмная энергія» апісвае яго ролю ў раўнаннях. Гэта не эмпірычнае атаясамленне з цёмнай энергіяй, выведзенай з касмалагічных назіранняў.

Тры розныя значэнні слова «энтрапія»

Звычайная тэрмадынамічная энтрапія лічыць, колькі мікраскапічных канфігурацый могуць даваць адзін макраскапічны стан. **Квантавая адносная энтрапія** вымярае адрознільнасць двух квантавых станаў. **GQRE** у гэтым артыкуле — спецыфічная для мадэлі геаметрычная канструкцыя, натхнёная адноснай энтрапіяй і выкарыстаная як гравітацыйны лагранжыян. Падобныя назвы не робяць гэтыя велічыні ўзаемазаменнымі; сувязі, якія выкарыстоўвае артыкул, выводзяцца ўнутры GfE.

Дакладны тэрмадынамічны вынік унутры мадэлі

Спачатку артыкул працуе на ўзроўні самой схемы GfE. Для кожнага парадку і тыпу геаметрычнай ступені свабоды, індэксаванага k, ён вызначае:

- лакальную k-энтрапію з GQRE;
- лакальную k-энергію з шчыльнасці ўнутранай энергіі мадэлі;
- спалучаную k-тэмпературу;
- і k-ціск.

Гэтыя велічыні падпарадкоўваюцца лакальнаму першаму закону. У абазначэннях артыкула:

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

Індэкс k — не пералік розных рэчываў або эпох Сусвету. У аднародным і ізатропным вылічэнні ён пазначае пяць пазіцый: адну скалярную; асобныя часападобную і прасторападобную пазіцыі вектарнага сектара; і асобныя часапрасторавую і прасторапрасторавую пазіцыі бівектарнага сектара. Скаляр не мае накіравальнага індэкса, вектарныя пазіцыі адрозніваюць часавы і прасторавыя кірункі, а бівектар будуецца з пар кірункаў. Кожны сектар можа мець уласныя тэмпературу і ціск. K-тэмпература можа быць дадатнай або адмоўнай у залежнасці ад адпаведнага кампанента G-поля.

Гэта не тэмпературы, якія вымераў бы тэрмометр каля касмалагічнага гарызонту. Стандартная тэмпература квантавага поля ў прасторы дэ Сітэра маштабуецца як H: **тэмпература Гібанса—Хокінга** прызначаецца касмалагічнаму гарызонту, а **вакуум Банча—Дэвіса** — стандартны інварыянтны адносна дэ Сітэра квантавы стан, карэляцыі поля якога даюць звязаны цеплавы адказ. Артыкул наўпрост адрознівае абодва паняцці ад геаметрычных k-тэмператур, якія ў прыкладзе дэ Сітэра маштабуюцца як H^2. Тут «тэмпература» пазначае тэрмадынамічна спалучаную зменную, выведзеную з вызначэнняў энтрапіі і энергіі мадэлі.

Таму тоеснасць першага закону сапраўды выведзеная, але гэта **вынік самой мадэлі**:

калі прыняць дзеянне і вызначэнні GfE, з іх вынікае гэтая тэрмадынамічная структура.

Чаму вылічэнне Фрыдмана з'яўляецца набліжэннем

Каб ператварыць фармалізм у касмалагічны прыклад, артыкул выкарыстоўвае аднародныя і ізатропныя прасторы-часы Фрыдмана—Робертсана—Уокера (FRW). «Аднародны» азначае, што буйнамаштабная мадэль мае аднолькавыя сярэднія ўласцівасці ў кожным пункце; «ізатропны» — што яна выглядае аднолькава ва ўсіх кірунках. Адзін маштабны фактар апісвае рост адлегласцяў з часам, матэрыя прадстаўляецца гладкай ідэальнай вадкасцю, а параметр Хабла H характарызуе хуткасць пашырэння. Гэта ідэалізаваны фон, а не карта асобных галактык.

Але існуе структурная неадпаведнасць. Сусветы Фрыдмана развязваюць раўнанні Эйнштэйна. У агульным выпадку яны не развязваюць поўныя раўнанні GfE вышэйшага парадку, якія таксама адсочваюць скалярныя, вектарныя і бівектарныя сектары і вытворныя G-поля. Раўнанні Эйнштэйна вяртаюцца толькі ў першым парадку, у нізкаэнергетычнай мяжы малой крывізны прапанаванай мадэлі.

Артыкул кажа пра гэта наўпрост і выкарыстоўвае развязанні Фрыдмана толькі як набліжэнне. Ідэя падобная да таго, каб падставіць развязанне сярэдняга поля ў больш поўную тэорыю і праверыць, у якіх умовах такое набліжэнне застаецца надзейным. Рэжым патрабуе нізкай энергіі і малой крывізны, што выражаецца ўмовай $l_P H \ll 1$, дзе l_P — планкаўская даўжыня. Другая ўмова патрабуе, каб здабытак індукаванай метрыкі вышэйшага парадку і адваротнай фізічнай метрыкі вышэйшага парадку заставаўся дадатна вызначаным.

Таму вынік — не «GfE прадказвае гісторыю нашага Сусвету». Дакладней сказаць так: **калі Сусвет GfE дастаткова добра набліжаецца знаёмай касмалогіяй Фрыдмана, вось якія тэрмадынамічныя маштабныя залежнасці даюць поўныя велічыні GfE.**

Лакальны вынік супраць поўнага

Унутры гэтага рэжыму вядучыя лакальныя велічыні маюць простыя маштабныя залежнасці:

- шчыльнасць энтрапіі мадэлі маштабуецца як H^2;
- шчыльнасць энергіі мадэлі — як H^4;
- для недэсітэраўскіх прыкладаў Фрыдмана на позніх часах гэта прыкладна t^{-2} і t^{-4}.

Абедзве шчыльнасці змяншаюцца па меры пашырэння Сусвету. Але шчыльнасць — не поўная колькасць.

Калі артыкул інтэгруе велічыні па вобласці прасторы-часу, якая пашыраецца, рост аб'ёму змяняе адказ. У звыклых фізічных прыкладах з дамінаваннем матэрыі і выпраменьвання поўная энтрапія расце з часам, нават калі энтрапія на адзінку аб'ёму зніжаецца. Поўная энергія не працягвае расці; у вядучым парадку яна набліжаецца да сталай.

Гэта найбольш карысны канцэптуальны вынік артыкула. Лакальнае ўпарадкаванне або разрэджванне не абавязкова супярэчыць глабальнаму другому закону. Вобласць можа станавіцца лакальна менш энтрапійнай на адзінку аб'ёму, а інтэгральная энтрапія — расці, калі аб'ём прасторы-часу павялічваецца хутчэй.

Вылічэнне не даказвае, што гэта правільнае мікраскапічнае тлумачэнне тэрмадынамічнай стралы часу ў рэальным Сусвеце. Яно паказвае, што прапанаваная схема можа несупярэчліва змясціць розніцу паміж лакальным і глабальным у набліжэнні Фрыдмана.

Параўнанне з дэ Сітэрам — але з іншай тэмпературай

Артыкул таксама разглядае прастору дэ Сітэра — ідэалізаваную прастору-час, якая экспаненцыяльна пашыраецца са сталым H. Для аднаго назіральніка інтэграванне выконваецца толькі па канечным **прычынным ромбе**: перасячэнні будучага светлавога конуса ранейшай падзеі з мінулым светлавым конусам пазнейшай, якое абмяжоўвае вобласць прасторы-часу, здольную ўдзельнічаць у назіраннях паміж імі. У гэтым ромбе поўная энтрапія GfE маштабуецца як H^{-2}, то-бок гэтак жа па H, як знаёмая энтрапія Гібанса—Хокінга. Поўная энергія GfE мае парадак адзінкі ў адзінках мадэлі.

> **Адна сям'я касмалагічных фонаў**
>
> FRW — сям'я аднародных і ізатропных геаметрый, а не дадатковае месца. Сусветы з дамінаваннем матэрыі і выпраменьвання — выпадкі FRW, якія адрозніваюцца зместам мадэлі. Прастору дэ Сітэра таксама можна запісаць у форме FRW, але яна прадстаўляе вакуумна-дамінаваны выпадак са сталым H і экспаненцыяльным пашырэннем. Прычынны ромб — канечная вобласць, выбраная ўнутры такой прасторы-часу для аднаго назіральніка; гэта не яшчэ адзін тып Сусвету.

Супадзенне маштабавання не азначае выраду таго самага фізічнага аб'екта. Звязаная k-тэмпература GfE маштабуецца як H^2, у адрозненне ад стандартнай тэмпературы дэ Сітэра, якая маштабуецца як H. Артыкул інтэрпрэтуе розніцу як указанне на тое, што k-тэмпература належыць геаметрыі прасторы-часу, а не квантавым палям на гэтым фоне.

Далей прапануецца, што такая тэмпература *магла б* быць звязаная з выпраменьваннем гравітонаў, а не звычайных часціц. Гэта пытанне для будучыні, не вынік артыкула. Спачатку тэорыю давялося б квантаваць, каб устанавіць, ці адпавядаюць яе тэмпературы якому-небудзь выпраменьванню ўвогуле.

Чаго гэта не даказвае

- Праца **не паказвае назіральна**, што гравітацыя ўзнікае з энтрапіі.
- Яна **не ўстанаўлівае**, што эфектыўны член мадэлі з'яўляецца цёмнай энергіяй, вымяранай у касмалогіі.
- Яна **не замяняе** агульную тэорыю адноснасці праверанай больш дасканалай тэорыяй. Агульная адноснасць з'яўляецца тут як нізкаэнергетычная мяжа малой крывізны прапановы.
- Яна **не робіць** касмалогіі Фрыдмана дакладнымі развязаннямі GfE. Яны з'яўляюцца набліжэннем, выкарыстаным для ацэнкі тэрмадынамічных паводзін мадэлі.
- Яна **не выводзіць** поўны мікраскапічны падлік ступеняў свабоды прасторы-часу.
- Яна **не дае** завершанай тэорыі квантавай гравітацыі і не выяўляе гравітоны.
- Яна **не паказвае**, што адмоўныя k-тэмпературы з'яўляюцца звычайнымі адмоўнымі паказаннямі тэрмометра.

Наколькі моцны вынік

Гэта рэцэнзаваны тэарэтычны артыкул, таму «доказы» тут азначаюць не тое самае, што ў эксперыменце. Дарэчныя пытанні: ці ўзгодненыя вызначэнні, ці вынікаюць высновы і ці відавочна зададзеныя і кантраляваныя набліжэнні.

На гэтым узроўні артыкул дае канкрэтны тэрмадынамічны слоўнік для GfE і выводзіць структуру першага закону, а не абапіраецца толькі на аналогію. Ён таксама незвычайна прама паказвае мяжу набліжэння: развязанні Фрыдмана запазычваюцца з агульнай тэорыі адноснасці, падстаўляюцца ў велічыні GfE і абмяжоўваюцца рэжымам, дзе індукаваная метрыка застаецца карэктнай.

Шырэйшыя фізічныя сцвярджэнні застаюцца адкрытымі. Схема новая, артыкул не параўноўвае яе касмалогію з данымі, а некаторыя найбольш цікавыя наступствы — квантаванне, кантактна-геаметрычная дынаміка і магчымае выпраменьванне гравітонаў — пададзеныя як кірункі будучай працы. Унутраная ўзгодненасць неабходная новай тэорыі гравітацыі, але недастатковая, каб паказаць, што тэорыя апісвае прыроду.

Чаму гэта важна

Сувязь паміж гравітацыяй і тэрмадынамікай старая і глыбокая — ад энтрапіі чорных дзірак да тэмпературы прасторы дэ Сітэра. Многія такія вынікі арганізаваныя вакол гарызонтаў. GfE замест гэтага спрабуе пабудаваць лакальную аб'ёмную інфармацыйную меру непасрэдна з дачынення паміж матэрыяй і геаметрыяй.

Ці выжыве прапанова, невядома. Але тэрмадынамічнае практыкаванне выяўляе

карыснае патрабаванне да любой падобнай тэорыі: яна павінна растлумачыць, як лакальная структура і спадальная лакальная шчыльнасць энтрапіі могуць суіснаваць з ростам поўнай энтрапіі ў Сусвеце, які пашыраецца.

Артыкул паказвае адзін матэматычна відавочны спосаб, як гэта можа адбывацца. Яго каштоўнасць не ў закрыцці праблемы сувязі гравітацыі і энтрапіі. Ён ператварае частку праблемы ў раўнанні, чые перадумовы, межы і далейшыя праверкі можна выразна сфармуляваць.

Кароткі вынік

Б'янконі выводзіць тэрмадынамічнае апісанне ўнутры Gravity From Entropy — прапанаванай мадыфікаванай гравітацыйнай схемы, заснаванай на геаметрычнай квантавай адноснай энтрапіі. Лакальныя зменныя энтрапіі, энергіі, тэмпературы і ціску мадэлі падпарадкоўваюцца першаму закону. Калі поўныя велічыні GfE вылічваюцца на нізкаэнергетычных набліжэннях Фрыдмана з малой крывізной, лакальныя шчыльнасці энтрапіі і энергіі падаюць падчас пашырэння Сусвету, але поўная энтрапія расце праз павелічэнне аб'ёму прасторы-часу; у прыкладах з дамінаваннем матэрыі і выпраменьвання поўная энергія ў вядучым парадку набліжаецца да сталай. Прычынны ромб дэ Сітэра дае энтрапію, якая маштабуецца як H^{-2}, але тэмпературу мадэлі, адрозную ад стандартнай тэмпературы гарызонту. Гэта ўмоўныя матэматычныя вынікі ўнутры GfE, а не назіральнае сведчанне таго, што гравітацыя паходзіць з энтрапіі, не вымярэнне цёмнай энергіі і не завершаная тэорыя квантавай гравітацыі.

Крыніцы

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