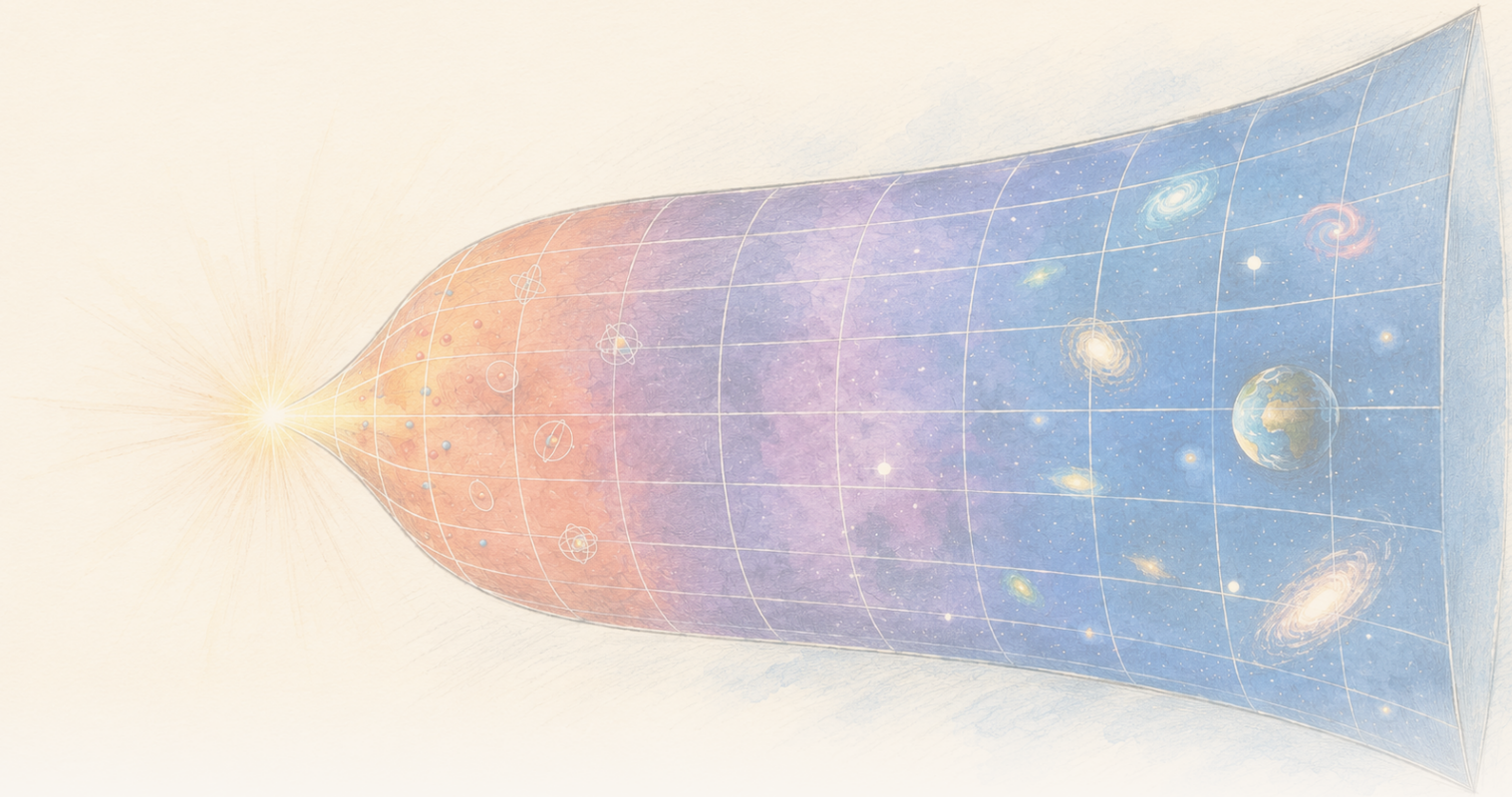

The Clean Paper

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

Model gravity entropy irratti hundaa'e tokko keessatti, local entropy density gadi bu'a yeroo total isaa ol ka'u

Barruun Physical Review D tokko Gravity From Entropy, proposed modified-gravity framework keessatti temperatures, pressures fi first law baasa. Late-time, low-curvature Friedmann approximation keessatti local entropy fi energy densities model gadi bu'u, expansion immoo total entropy ol kaasa. Calculation'n internally konkret dha, garuu conditional: Friedmann cosmologies full theory exact solutions miti; kun gravity entropy irraa dhufa jedhuuf observational evidence miti, dark energy safarameef explanation miti, quantum-gravity theory xumurame miti.

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

Hangi naannoo tokko guddachaa yoo deeme, cufamni isaa hir'atus waliigalli dabalu danda'a

Moodeela kana keessatti, yeroo addunyaan bal'achaa deemu cufamni entropy yoo hir'ate, entropy waliigalaa akkamitti dabalu danda'a?

Addunyaa bal'achaa jiru tokko seelota xixiqqoo hedduutti qoodame jennee yaadnaa. Seelii tokko keessatti hanga wanta tokkoo hir'achuu danda'a; yeroo wal fakkaatutti garuu naannoon guutuun waan guddatuuf, waliigalli isaa dabalu danda'a. Yeroo volume ofii jijjiiramaa jiru, cufamni hir'achuun fi waliigalli dabaluun wal faallaa miti.

Gaaffiin herregaa salphaan kun barruu tiyoorii baay'ee bal'aa tokko gidduu jira. Barruu Physical Review D keessatti, fiizistii herregaa Ginestra Bianconi **Gravity From Entropy** (GfE) jedhamuuf ibsa teermoodaynaamikii diriirsa. GfE moodeela haaraa dhihaate dha; isa keessatti harkisni, maaterii fi ji'oomeetirii gidduu walitti dhufeenya odeeffannoo irratti hundaa'een ibsama. Asitti "odeeffannoo irratti hundaa'e" jechuun, moodeelli safartuu herregaa ji'oomeetirii lama — ji'oomeetirii fiizikaalaa fi kan maaterii fi qaxxaamura irraa maddu — gidduu garaagarummaa safaru irraa jalqaba jechuu dha.

Barruun baay'inoota naannoo keessaa **k-entropy**, **k-energy**, **k-temperature** fi **k-pressure** jedhaman baasa. Mallattoon k kutaa ji'oomeetirii adda addaa moodeela keessaa adda baasuuf tajaajila; wantoota adda addaa yookaan yeroo addunyaa adda addaa miti. Walitti dhufeenyi seera jalqabaa isaanii akka teermoodaynaamikii keessatti argamutti boca herregaa tokko qaba: jijjiiramni anniisaa, ho'a dachaa jijjiirama entropy irraa, dhiibbaa dachaa jijjiirama volume hir'isuun wal qabata.

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

Sana booda barruun baay'inoota kana addunyaa Friedmann bal'achaa jiran irratti shallaga. Isaan addunyaa yaad-rimee, sadarkaa guddaa irratti bakka hundatti wal fakkaatan fi kallattii hundaan wal fakkaatan dha. Haala anniisaan gadi-aanaa fi qaxxaamurri xiqqaa ta'e keessatti, fakkeenyonni maaterii fi raadiyeeshiniin mootummaa keessa jiran cufama entropy fi anniisaa naannoo keessaa hir'achaa deemu qabu; garuu volume'n waan guddatuuf entropy waliigalaa ni dabala. Anniisaan waliigalaa sadarkaa herregaa isa ijoo irratti gara gatii dhaabbataatti dhihaata; jechuun yeroo dheeraa keessatti termii mootummaa keessa jiraatu qofa fudhatanii kanneen saffisaan badanii deeman dhiisan.

Kun bu'aa herregaa ifaa dha. Daangaan isaa garuu akkuma bu'aa sanaa barbaachisaa dha: shallaggiin kun **tiyoorii dhihaate tokko keessa** raawwatama; addunyaawwan Friedmann fakkeenyaaf fayyadamanis furmaata sirrii guutuu walqixxaattoota GfE miti, **tilmaama** qofa. Walqixxaattoonni GfE guutuun gocha GfE dhihaate jijjiiruun argamu; isaan G-dirree socho'aa fi kutaalee ji'oomeetirii sadarkaa ol-aanaa, walqixxaattoota Friedmann idilee keessatti hin jirre, of keessaa qabu. Barruun kun entropy harkisa uuma jechuun hin ilaalle; anniisaa dukkanaa'aa addunyaa keenya keessa jiru hin adda baafne; tiyoorii quantum gravity guutuus hin xumurree.

Gravity From Entropy maal irratti hundaa'a?

Relativity waliigalaa harkisa karaa ji'oomeetirii spacetime ibsa. Maateriin spacetime akkamitti qaxxaamuru akka qabu murteessa; qaxxaamurri sunis maateriin akkamitti socho'u akka qabu murteessa. GfE gocha dhihaate biraa irraa jalqaba: wantoota meetirikii waliin wal qabatan akka **quantum operators** ta'anii ilaalamu jedha; Lagrangian isaa ammoo **Geometric Quantum Relative Entropy** (GQRE) irraa ijaara.

Jechoota sadii daqiiqaa lama keessatti

Quantum operator jechuun seera herregaa haala quantum tokko irratti hojjetu, hanga yookaan jijjiirama tokko bakka bu'u dha. GfE wantoonni meetirikii waliin wal qabatan akkasitti ilaalamuu danda'u jedhee yaada; barruun kun ijaarsa sana dubbisaan akka irra deebi'ee hojjetu hin gaafatu.
Lagrangian jechuun seera herregaa gabaabaa, sochii tiyoorii tokkoo ibsu dha. Spacetime guutuu irratti walitti qabamuun gocha argamsiisa; gocha sana jijjiiruun walqixxaattoota damee baasa.
GQRE jechuun Lagrangian addaa GfE filate dha. Yaada quantum relative entropy irraa fudhatee, meetirikii fiizikaalaa fi meetirikii sadarkaa ol-aanaa maaterii fi qaxxaamura irraa maddu wal bira qaba. "Entropy" jedhamee waamamuun entropy ho'aa idilee waliin tokko isa hin godhu.

Relative entropy yeroo baay'ee kuusaa carraa lama yookaan haala quantum lama hammam adda akka ta'an safara. GfE keessatti walbira qabamuun meetirikii fiizikaalaa fi meetirikii sadarkaa ol-aanaa maaterii fi qaxxaamura irraa maddu gidduu dha. "Sadarkaa ol-aanaa" jechuun spacetime dimension dabalataa jechuu miti. Moodeelli kutaalee scalar, vector-fakkaataa fi bivector-fakkaataa wanta guddaa tokko keessatti walitti qaba jechuu dha. **G-dirree** socho'aan kutaalee kana walitti hidha; meetirikii kutaalee harkisaa fi maaterii keessatti fayyadamu "uffisa". Bu'uura kun, haala anniisaan gadi-aanaa fi qaxxaamurri xiqqaa ta'e keessatti, gochi isaa gara gocha Einstein-Hilbert kan relativity waliigalaa fi gocha maateriitti akka deebi'u ijaarame.

Jechoota dhumaa kana caalaa hiikuu salphaa dha. Daangaa tokko keessatti walqixxaattoota Einstein deebisanii argachuun, yaada dhihaate tokkoof qormaata wal-simuu dha. Uumamni daangaa sana ala tiyoorii guddaa kana fayyadama jechuu hin agarsiisu.

Walqixxaattoonni GfE termii socho'aa, bu'uura keessatti **termii anniisaa dukkanaa'aa bu'a-qabeessa madde** jedhamee waamamu illee qabu. Barruu kana keessatti Bianconi cufama anniisaa keessaa moodeelaa termii sana waliin adda baasa. "Anniisaa dukkanaa'aa bu'a-qabeessa" jechuun walqixxaattoota keessatti gahee isaa ibsa; anniisaa dukkanaa'aa ilaalcha kosmooloojii irraa tilmaamamu waliin ragaan tokko ta'e jechuu miti.

Jecha "entropy" jedhu bakka sadii adda addaatti

Entropy teermoodaynaamikii idilee jechuun, haala guddaa tokko uumuuf qindaa'ina xix-

> iqqoo meeqa akka jiruu wajjin wal qabata. **Quantum relative entropy** haala quantum lama hammam adda akka ta'an safara. **GQRE** barruu kana keessatti ijaarsa ji'oomeetirii addaa, relative entropy irraa yaada fudhatee akka Lagrangian harkisaatti fayyadamu dha. Maqaan wal fakkaachuun isaanii baay'inoota kana wal jijjiiramaa hin godhu; walitti dhufeenya fayyadamu barruun GfE keessaa baasa.

Bu'aa teermoodaynaamikii sirrii moodeela keessaa

Barruun jalqaba sadarkaa bu'uura GfE irratti hojjetu. Sadarkaa fi gosa bilisummaa ji'oomeetirii tokkoon tokkoon, k'n adda baafamuuf, kanneen armaan gadii hiika:

- k-entropy naannoo keessaa GQRE irraa;
- k-energy naannoo keessaa cufama anniisaa moodeelaa irraa;
- k-temperature wal-qabataa;
- fi k-pressure.

Baay'inoonni kun seera jalqabaa naannoo keessaa hordofu. Mallattoo barruu keessatti:

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

Mallattoon k wantoota adda addaa yookaan yeroo addunyaa adda addaa tarreessu miti. Shallaggii bakka hundatti fi kallattii hundaan wal fakkaatu keessatti galteewwan shan adda baasa: scalar tokko; vector-fakkaataa keessaa yeroo fi iddoo adda; bivector-fakkaataa keessaa yeroo-iddoo fi iddoo-iddoo adda. Scalar kallattii hin qabu; galteewwan vector-fakkaataa yeroo fi iddoo adda baasu; bivector ammoo kallattii lama irraa ijaarama. Kutaan tokkoon tokkoon ho'a fi dhiibbaa ofii qabaachuu danda'a. k-temperature'n gatii pooziitivii yookaan negaatiivii qabaachuu danda'a, akka component G-dirree sanaatti.

Kanneen kun ho'a teermomeetira tokko daangaa kosmooloojii bira kaa'uun safaramu miti. Ho'i de Sitter kan quantum dirree theory keessatti beekamu H waliin madaala: **Gibbons-Hawking temperature** daangaa kosmooloojii irratti ramadama; **Bunch-Davies vacuum** ammoo haala quantum de Sitter waliin wal-simu, walitti dhufeenyi damee isaa deebii ho'aa sana kennu dha. Barruun lamaanuu k-temperature ji'oomeetirii isaa irraa ifatti adda baasa; fakkeenya de Sitter keessatti k-temperature'n H^2 waliin madaala. Asitti "temperature" jechuun baay'ina teermoodaynaamikii, hiika entropy fi anniisaa moodeelaa irraa maddu dha.

Kanaaf walqixxaattoon seera jalqabaa dhugumaan keessaa baafame; garuu bu'aan kun **moodeela keessaa** dha: gocha GfE fi hiika baay'inoota isaa fudhadhu, caasaan teermoodaynaamikii kun ni hordofa.

Maaliif shallaggiin Friedmann tilmaama qofa?

Bu'uura herregaa sana gara fakkeenya kosmooloojiitti geessuuf, barruun spacetime Friedmann-Robertson-Walker (FRW) bakka hundatti fi kallattii hundaan wal fakkaatu fayyadama. "Homogeneous" jechuun moodeelli sadarkaa guddaa irratti bakka hundaatti amaloota giddugaleessaa wal fakkaatan qaba; "isotropic" jechuun kallattii hunda irraa wal fakkaata. Scale factor tokko fageenyi yeroo waliin akkam akka guddatu ibsa; maateriin akka dhangala'aa sirrii walitti makameetti bakka buufama; Hubble parameter H saffisa bal'ina sana gabaabaatti ibsa. Kun duubbee yaad-rimee dha; kaartaa galaaksii dhuunfaa miti.

Garuu wal-simuu dhabuu caasaa tokko jira. Addunyaawwan Friedmann walqixxaattoota Einstein furu. Walqixxaattoota GfE sadarkaa ol-aanaa guutuu, kan kutaalee scalar, vector-fakkaataa, bivector-fakkaataa fi derivative G-dirree illee hordofan, waliigalaan hin furan. Walqixxaattoonni Einstein yaada dhihaate kana keessatti sadarkaa jalqabaa, anniisaa gadi-aanaa fi qaxxaamura xiqqaa keessatti qofa deebi'u.

Barruun kana ifatti dubbata; furmaata Friedmann akka tilmaamaatti fayyadama. Mala kana, furmaata dirree giddugaleessaa tiyoorii bal'aa tokko keessa galchanii bakka tilmaamni sun amanamaa ta'uu itti fufu qorachuun wal bira qaba. Haalli hojii kun anniisaa gadi-aanaa fi qaxxaamura xiqqaa barbaada; gabaabaatti $l_P H \ll 1$, bakka l_P dheerina Planck ta'etti. Ulaagaan lammaffaan, baay'ata meetirikii sadarkaa ol-aanaa madde fi inverse meetirikii fiizikaalaa sadarkaa ol-aanaa pooziitiv-deefinaayit ta'ee akka hafu barbaada.

Kanaaf bu'aan "GfE seenaa addunyaa keenya tilmaama" miti. Isaatti dhihoo kan ta'e: **addunyaan GfE kosmooloojii Friedmann beekamaa tokkoon gahaa gaariitti yoo tilmaamame, baay'inoonni GfE guutuun madaallii teermoodaynaamikii kana kennu.**

Bu'aa naannoo keessaa fi waliigalaa

Haala sana keessatti baay'inoonni naannoo keessaa sadarkaa ijoo irratti salphaatti madaalu:

- cufamni entropy moodeelaa H^2 waliin;
- cufamni anniisaa moodeelaa H^4 waliin;
- fakkeenya Friedmann de Sitter hin taane keessatti, yeroo dheeraa irratti tartiibaan gara t^{-2} fi t^{-4}tti.

Kanaaf cufamni lamaan addunyaan bal'achaa yeroo deemu ni hir'atu. Garuu cufamni waliigala miti.

Barruun naannoo spacetime bal'achaa jiru guutuu irratti yeroo walitti qabu, volume'n guddachaa jiru deebii jijjiira. Fakkeenya maateriin mootummaa keessa jiru fi kan raadiyeeshiniin mootummaa keessa jiru keessatti, entropy waliigalaa yeroo waliin ni dabala; entropy volume tokko keessaa garuu ni hir'ata. Anniisaan waliigalaa itti fufee hin guddatu; sadarkaa ijoo irratti gara gatii dhaabbataatti dhihaata.

Kun bu'aa yaad-rimee barruu keessaa isa faayidaa guddaa qabu dha. Naannoo keessaa qindaa'ina dabaluun yookaan cufama entropy hir'isuun, seera lammaffaa waliigalaa waliin ofumaan wal hin faallessu. Volume spacetime saffisaan waan guddatuuf, cufamni entropy naannoo keessaa hir'atus entropy walitti qabame dabalu danda'a.

Shallaggiin kun xiyya teermoodaynaamikii addunyaa dhugaa keessatti maal irraa akka maddu microscopic sadarkaa irratti mirkaneessu miti. Tilmaama Friedmann keessatti, bu'uura dhihaate kun garaagarummaa naannoo keessaa fi waliigalaa wal faallaa malee qabachuu danda'a qofa agarsiisa.

Walbira qabuu de Sitter — ho'i isaa garuu adda

Barruun spacetime de Sitter, jechuun spacetime yaad-rimee saffisa H dhaabbataa fi bal'ina eksponentaalaa qabu illee ilaala. Nama ilaalu tokkoof **causal diamond** daangeffame qofa irratti walitti qaba: naannoo cone ifaa fuulduraa taatee duraa fi cone ifaa duubaa taatee boodaa wal irra bu'an. Naannoon kun spacetime keessaa kutaa taateewwan lamaan gidduutti ilaalcha keessatti hirmaachuu danda'u daangessa. Diamond sana irratti entropy GfE waliigalaa H^{-2} waliin madaala; kun madaallii Gibbons-Hawking entropy beekamaa waliin wal fakkaata. Anniisaan GfE waliigalaa uniti moodeelaa keessatti sadarkaa tokko naannoo dha.

> **Maatii duubbee kosmooloojii tokko**
>
> FRW maatii ji'oomeetirii bakka hundatti fi kallattii hundaan wal fakkaatan dha; bakka dabalataa tokko miti. Addunyaawwan maateriin mootummaa keessa jiru fi raadiyeeshiniin mootummaa keessa jiru gosa FRW dha; maal akka moodeela guutu irratti adda ba'u. De Sitter illee boca FRW keessatti barreeffamuu danda'a, garuu vakuumiin mootummaa keessa jiru, H dhaabbataa fi bal'ina eksponentaalaa qaba. Causal diamond naannoo spacetime sana keessaa nama ilaalu tokkoof filatame dha; gosa addunyaa biraa miti.

Madaallii tokko wal fakkaachuun, wanta fiizikaalaa tokkoon tokko akka ta'an baasuu miti. k-temperature GfE waliin wal qabatu H^2 waliin madaala; ho'i de Sitter istaandaardii ammoo H waliin madaala. Barruun garaagarummaa kana, k-temperature'n ji'oomeetirii spacetime keessaa akka dhufu, quantum fields duubbee sana irra jiraatan irraa akka hin dhufne agarsiisu jedhamee hiika.

Sana booda ho'i gosa kanaa raadiyeeshinii graviton waliin wal qabachuu *danda'a* jechuun yaada dhiheessa; zarraawwan idilee ba'uu waliin miti. Kun gaaffii hojii fuulduraa dha, bu'aa barruu kanaa miti. Tiyooriin sun jalqaba quantaayiz godhamuu qaba; sana booda ho'i isaa dhugumaan raadiyeeshinii waliin wal qabata moo miti jechuun qoratamuu danda'a.

Wanti kun hin mirkaneessine

- Harkisni entropy irraa madda jechuun ragaa ilaalchaa **hin kennu**.
- Termiin bu'a-qabeessa moodeelaa anniisaa dukkanaa'aa kosmooloojii keessatti safaramu sana dha jechuun **hin mirkaneessu**.
- Relativity waliigalaa bakka buusee tiyoorii caalaa gaarii qorame **hin ta'u**. Relativity waliigalaa barruu kana keessatti daangaa anniisaa gadi-aanaa fi qaxxaamura xiqqaa keessatti deebi'a.
- Kosmooloojiin Friedmann furmaata GfE sirrii guutuu **hin ta'u**. Isaan tilmaama amaloota teermoodaynaamikii moodeelaa shallaguuf fayyadaman dha.
- Bilisummaa spacetime microscopic guutuu lakkaa'u **hin baasu**.
- Tiyoorii quantum gravity xumurame **hin kennu**, gravitonis hin adda baasu.
- k-temperature negaatiivii jechuun teermomeetirri ho'a negaatiivii idilee dubbisa jechuu **hin agarsiisu**.

Bu'aan hammam cimaa dha?

Kun barruu tiyoorii gamaaggama ogeessotaa keessa darbe dha; kanaaf "ragaa" jechuun asitti hiika yaalii tokko keessatti qabu irraa adda. Gaaffileen sirrii: hiikawwan wal-simu moo? Baasawwan herregaa isaanii ni hordofuu? Tilmaamawwan isaanii ifatti ibsamanii, daangeffamanii jiruu?

Sadarkaa kana irratti barruun GfE'f jechoota teermoodaynaamikii ifaa diriirsa; wal fakkeessuu qofa irratti hirkachuu mannaa caasaa seera jalqabaa keessaa baasa. Daangaa tilmaamaa illee ifatti agarsiisa: furmaata Friedmann relativity waliigalaa irraa fudhatamee baay'inoota GfE keessa galfama; haala meetirikiin madde sirriitti of eegu keessatti qofa fayyadama.

Himannoowwan fiizikaalaa guddaan garuu banaa dha. Bu'uura kun haaraa dha; barruun kun kosmooloojii isaa daataa waliin hin wal bira qabne. Bu'aawwan isaa keessaa kanneen nama hawwatan hedduun — quantaayizeeshinii, sochii contact-geometric fi raadiyeeshinii graviton ta'uu danda'u — hojii fuulduraa ta'anii dhihaatu. Tiyoorii harkisaa haaraaf wal-simni keessaa barbaachisaa dha. Uumama dhugaa ibsa jechuun garuu isa qofaan hin ga'u.

Maaliif barbaachisaa dha?

Walitti dhufeenyi harkisaa fi teermoodaynaamikii dulloomaa fi gadi fagoo dha — entropy boolla gurraachaa irraa hanga ho'a de Sittertti. Bu'aawwan hedduun daangaa horizon irratti ijaaraman. GfE garuu safartuu odeeffannoo naannoo keessaa, volume irratti hundaa'e, walitti dhufeenya maaterii fi ji'oomeetirii irraa kallattiin ijaaruuf yaala.

Yaadni kun ni dhaabbata moo hin dhaabbatu jechuun gaaffii banaa dha. Garuu shaakalli teermoodaynaamikii kun galma faayidaa qabu tokko mul'isa: tiyooriin akkasii, caasaan naannoo keessaa fi cufamni entropy naannoo keessaa hir'achuun, addunyaa bal'achaa keessatti entropy waliigalaa

dabalu waliin akkamitti waliin jiraachuu akka danda'u ibsuu qaba.

Barruun kun karaa herregaan ifatti ibsame tokkoon kun akkamitti ta'uu akka danda'u agarsiisa. Faayidaan isaa rakkoo harkisaa-entropy xumuruun miti; kutaa rakkoo sanaa gara walqixxaattoota yaada bu'uuraa, daangaa fi qormaata itti aanu ifatti ibsuu dandeenyu jijjiiru dha.

Cuunfaa gabaabaa

Bianconi Gravity From Entropy keessatti ibsa teermoodaynaamikii baasa. GfE bu'uura harkisaa jijjiirame, geometric quantum relative entropy irratti hundaa'e dha. Baay'inoonni entropy, anniisaa, ho'a fi dhiibbaa naannoo keessaa moodeelaa seera jalqabaa tokko hordofu. Yeroo baay'inoonni GfE guutuun tilmaama Friedmann anniisaa gadi-aanaa fi qaxxaamura xiqqaa qabu irratti shallagaman, cufamni entropy fi anniisaa naannoo keessaa addunyaan bal'achaa yeroo deemu ni hir'ata; volume spacetime waan guddatuuf entropy waliigalaa garuu ni dabala. Fakkeenya maaterii fi raadiyeeshinii mootummaa keessa jiran keessatti anniisaan waliigalaa sadarkaa ijoo irratti gara gatii dhaabbataatti dhihaata. Causal diamond de Sitter entropy H^{-2} waliin madaalu kenna; ho'i moodeelaa garuu ho'a horizon istaandaardii irraa adda. Kanneen bu'aawwan herregaa haala GfE keessaa argaman dha; harkisni entropy irraa madda jechuun ragaa ilaalchaa, safartuu anniisaa dukkanaa'aa yookaan tiyoorii quantum gravity xumurame miti.

Maddoota

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