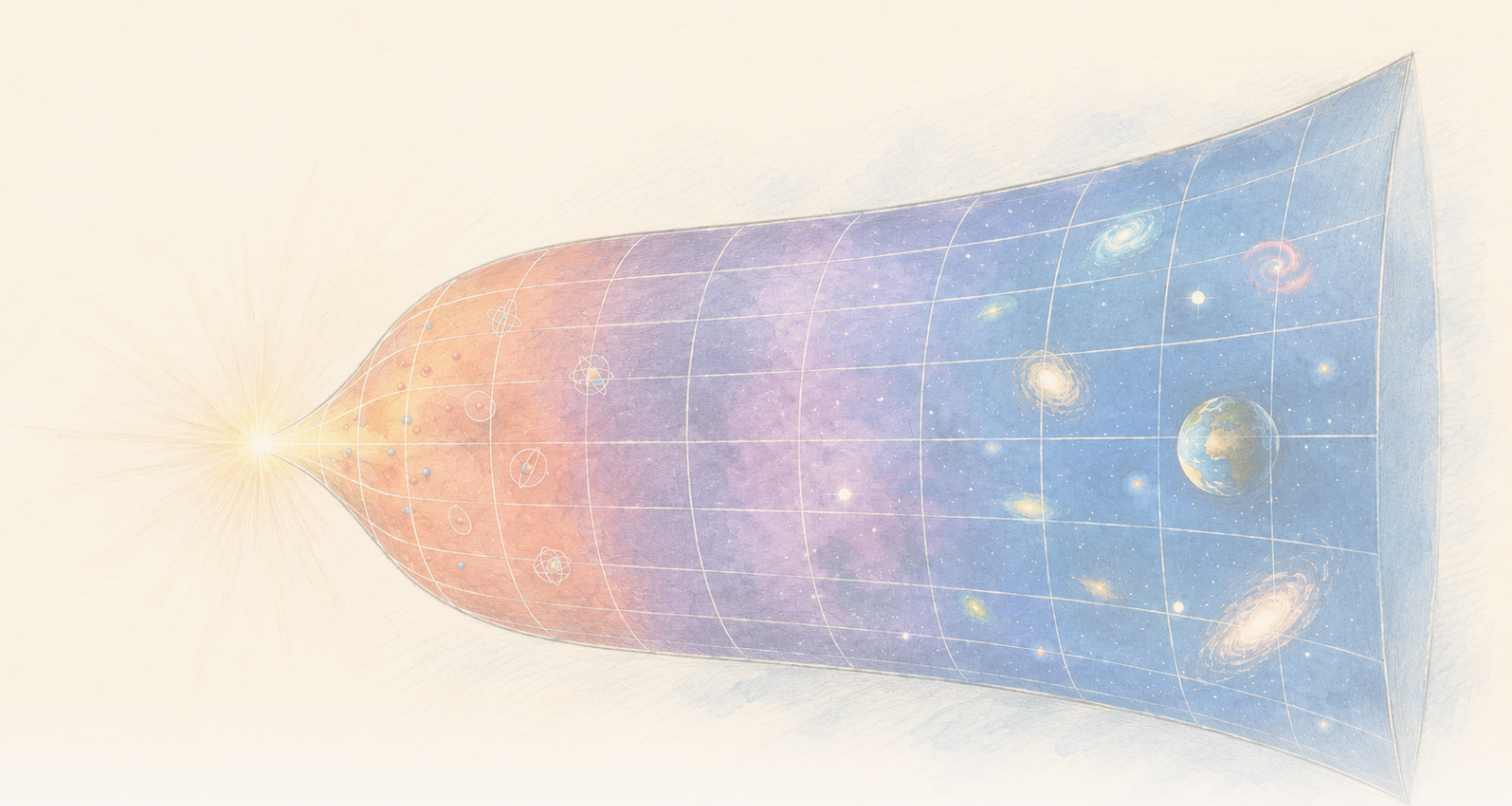




The CLEAN PAPER

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

Nínú model gravity tó dá lórí entropy, local entropy density ń dín kù nígbà tí total ń pò sí i

Paper Physical Review D kan derive temperature, pressure àti first law nínú Gravity From Entropy, proposed modified-gravity framework. Nínú late-time, low-curvature Friedmann approximation, local entropy àti energy density model ń dín kù nígbà tí expansion ń mú total entropy pò sí i. Calculation náà concrete nínú theory, ṣùgbón conditional: Friedmann cosmology kì í ṣe exact solution tí full theory, èyí kì í sè ṣe observational evidence pé gravity wá láti entropy, explanation tí measured dark energy, tàbí completed quantum-gravity theory.

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

Ìwòn didun tó n pò lè dín ìwúwo kù nígbà tí total n pò sí i

Tí entropy ìwúwo àwòṣe yí bá n dín kù bí àgbáyé ṣe n gbooro, báwo ni entropy àpapò rẹ ṣe tún lè pò sí i?

Foju inú wo àgbáyé tó n gbooro tí a pín sí ṣẹ̀lì kékeré-kékeré. Iye nkan kan nínú ṣẹ̀lì kòòkan lè dín kù nígbà tí iye àpapò kọ́já gbogbo agbègbè tó n gbooro n pò sí i. Dídín ìwúwo kù àti pípò total sí i kì í ṣe òḍikejì nígbà tí ìwòn didun fúnra rẹ n yí padà.

Ìṣòro accounting rọ̀rùn yẹn wà ní ọkàn ti àbá-ẹ̀kọ́ ìwé ìwádíí tó ní ifẹ́ nílá sí i. Nínú Physical Review D, mathematical physicist Ginestra Bianconi kọ àpejuwe thermodynamics ti **Gravity From Entropy** (GfE), àwòṣe tuntun kan tí a dabaa níbi tí agbára walẹ ti encode nípasẹ̀ ibáṣepọ̀ tó dá lórí ìṣofúnni láàárín ohun èlò àti jíómẹ̀trì. Níbi yí, “information-theoretic” tùmọ̀ sí pé àwòṣe náà bèrẹ̀ láti ìwòn ìṣirò ti bí description jíómẹ̀trì méjì ṣe yàtò: jíómẹ̀trì ti fíṣìṣì àti jíómẹ̀trì tí ohun èlò àti ìkò induce.

Ìwé ìwádíí náà derive agbègbè iye tí a n pè ní k-entropy, k-energy, k-ìwòn ooru àti k-títẹ. Prefix *k* ya geometric sector tó yàtò nínú àwòṣe; wọn kì í ṣe substance tó yàtò tàbí cosmic era tó yàtò. First-law relation wọn ní ìrísí ìṣirò kan náà bí thermodynamics: ìyípadà agbára ní relation pèlú ìwòn ooru ilọpo ìyípadà entropy, yọ títẹ ilọpo ìyípadà ìwòn didun kúrò.

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

Lẹ́yìn náà ìwé ìwádíí náà evaluate iye wònyí ní lílo kosmoloji Friedmann tó n gbooro: idealized àgbáyé standard tí homogeneous àti isotropic ní ìwòn nílá. Nínú agbára-kékeré, ìkò-kékeré ipò, example ohun èlò-dominated àti radiation-dominated ní agbègbè entropy àti agbára ìwúwo tó n dín kù, ṣùgbón ìgbooro n fúnni ní ìwòn didun tó pò tó kì entropy àpapò lè pò sí i. Total agbára n sún mó constant ní ìpele àkókó, iye n lẹ́yìn fífi dominant large-time term pamọ̀ àti yíyọ term tí ó n parẹ̀ yára sí i bí àkókò ṣe n pò.

Èyí jẹ mathematical èsì tó mó. Àlàà rẹ náà ṣe pàtàkì: ìṣirò náà wà **nínú àbá-ẹ̀kọ́ kan tí a dabaa**, Friedmann cosmology tí a lò fún concrete example sì jẹ **ìsúnmọ́**, kì í ṣe ojútúú gangan ti full GfE equation. Equation of motion wònyí wá láti variation ti proposed GfE action, wọn sì ní dynamical G-field àti higher-order geometric sector tí ordinary Friedmann equation kò ní. ìwé ìwádíí náà kò observe pé entropy n dá agbára walẹ̀ sílẹ̀, kò identify dark agbára nínú Universe wa, kò sì parí quantum-gravity àbá-ẹ̀kọ́.

Ohun tí Gravity From Entropy n assume

General relativity ṣàpẹ̀júwe agbára walẹ̀ nípasẹ̀ jíómẹ̀trì spacetime. Matter n sọ fún spacetime bí yóò ṣe curve, ìkò yẹn sì n sọ fún ohun èlò bí yóò ṣe rìn. GfE bèrẹ̀ láti proposed action tó yàtò: ó ka metric-related object sí opereto quantum, ó sì kọ Lagrangian rẹ̀ láti **Geometric Quantum Relative Entropy** (GQRE).

Ọ̀rọ̀ méta nínú 120 second

Quantum operator jẹ mathematical òfin tí ó ní ọ̀ṣiṣẹ́ lórí quantum ipò, tí ó sì dúró fún iye tàbí transformation kan. GfE assume pé metric-related object rẹ̀ lẹ́ jẹ́ treated ní ọ̀nà yí; article náà kò béèrè kí olùkà tún construction náà ẹ.

Lagrangian jẹ mathematical recipe tó compact fún dynamics àbá-ẹ̀kọ́ kan. Integrate rẹ̀ kojá spacetime láti gba action, lẹ́yìn náà vary action yẹn láti derive idogba pápá.

GQRE ni model-specific Lagrangian tí GfE yan. Ó adapt idea quantum entropy ibatan láti fi physical metric wé higher-order metric tí ohun èlò àti ìkọ́ induce. Pípè é ní entropy kò tùmọ́ sí pé ó jẹ́ ordinary heat entropy.

Relative entropy sáà jẹ́ measure ti distinguishability láàárín pín-pín ọ̀ṣeṣe méjì tàbí quantum ipò méjì. Nínú GfE, àfiwé náà wà láàárín physical metric àti higher-order metric tí ohun èlò àti ìkọ́ induce. “Higher-order” kò tùmọ́ sí extra spacetime dimension. Ó tùmọ́ sí pé àwòṣe kó scalar, vector-type àti bivector-type geometric sector jọ sínú enlarged object kan. Dynamical **G-field** kan so component wọ̀nyí pọ̀, ó sì “dress” metric tí a lò nínú agbára walẹ̀ àti ohun èlò part àwòṣe. Framework náà jẹ́ constructed kí, nínú agbára-kékeré àti ìkọ́-kékeré ààlà, action rẹ̀ dín padà sí Einstein-Hilbert action tí gbogbogbò relativity pèlú ohun èlò action.

Gbolóhùn ikehin yẹn rọ̀rùn láti ka ju ohun tí ó tùmọ́ sí lọ. Recovering Einstein’s equation nínú ààlà jẹ́ àfojúsùn ibámu fún proposal. Kò fi hàn pé nature ní lo larger àbá-ẹ̀kọ́ níta ààlà yẹn.

GfE idogba pápá tún ní dynamical term tí àgbékalẹ̀ náà ní pè ní **emergent effective dark-energy term**. Nínú ìwé ìwádíí yí, Bianconi identify internal-energy ìwúwo àwòṣe pèlú term yẹn. “Effective dark agbára” ní ọ̀pèjùwe role rẹ̀ nínú equation. Kí í ẹ́ idánimọ́ tó dá lórí ẹ̀rì pèlú dark agbára tí àkíyèsí kosmoloji infer.

Ìlò mètá tó yàtò ti ọ̀rọ̀ “entropy”

Ordinary thermodynamic entropy ní ka iye microscopic arrangement tí ó lè dá macroscopic ipò kan sílẹ̀.

Quantum entropy ibatan ní díwọ̀n bí quantum ipò méjì ẹ́ distinguishable tó. **GQRE** nínú ìwé ìwádíí yí jẹ́ model-specific geometric construction tí entropy ibatan inspire, tí a sì lò gégẹ́ bí gravitational Lagrangian. Orúkọ tó jọra kò mú iye wọ̀nyí di interchangeable; ìwé ìwádíí náà derive connection tí ó lò nínú GfE.

Exact thermodynamic èsì nínú àwòṣe

Ìwé ìwádíí náà kọ́kọ́ ọ̀ṣiṣẹ́ ní ìpele GfE àgbékalẹ̀ fúnra rẹ̀. Fún order àti type geometric degree of freedom kọ̀ọ́kan, tí index k ní samisi, ó define:

- agbègbè k -entropy láti GQRE;
- agbègbè k -energy láti internal-energy ìwúwo àwòṣe;
- conjugate k -ìwọ̀n ooru;
- àti k -títẹ̀.

Quantity wọ̀nyí obey agbègbè first law. Nínú notation ìwé ìwádíí,

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

Index k kì í ẹ list substance tàbí era Universe tó yàtò. Nínú homogeneous àti isotropic ìṣirò, ó label entry mǎrùn-ún: scalar entry kan; separate timelike àti spacelike entry láti vector-type sector; àti separate time-space àti space-space entry láti bivector-type sector. Scalar kò ní directional index, vector-type entry ya temporal ìtọ̀sọ̀nà sí spatial ìtọ̀sọ̀nà, bivector sì jẹ built láti pair ìtọ̀sọ̀nà. Sector kòòkan lè ní ìwọ̀n oorú àti títẹ̀ tirẹ̀. K-ìwọ̀n oorú tún lè jẹ positive tàbí negative, gégẹ̀ bí G-field component tí ó bá a mu ẹ rí.

Àwọ̀n yí kì í ẹ ìwọ̀n oorú tí a measure nípa fífi ẹrọ ìwọ̀n oorú lẹgbẹ́ cosmological horizon. Standard de Sitter quantum-field ìwọ̀n oorú scale pẹ̀lú H : **Gibbons-Hawking ìwọ̀n oorú** ni a assign sí cosmological horizon, nígbà tí **Bunch-Davies vacuum** jẹ standard de Sitter-invariant quantum ipò tí field correlation rẹ̀ ní fúnni ní thermal ìdáhùn tó bá a mu. ìwé ìwádíí nàà ya méjèèjì kedere sí geometric k-ìwọ̀n oorú rẹ̀, tí ó scale pẹ̀lú H^2 nínú de Sitter example. Níbi yí, “ìwọ̀n oorú” jẹ orúkọ thermodynamic conjugate variable tí a derive láti entropy àti agbára definition àwòṣe.

Nítorí nàà first-law identity jẹ derivation gidi, ẹ̀gbọ̀n ó jẹ **internal èsì**: gba GfE action àti definition, thermodynamic ìṣètò yí sì tẹ̀lẹ̀.

Kí ló dé tí Friedmann ìṣirò fi jẹ ìsúnmọ?

Láti yí àgbékalẹ̀ ìṣirò nàà sí cosmological example, ìwé ìwádíí lo homogeneous àti isotropic Friedmann-Robertson-Walker (FRW) spacetime. “Homogeneous” tùmọ̀ sí pé large-scale àwòṣe ní average property kan nàà ní gbogbo location; “isotropic” tùmọ̀ sí pé ó rí bakanna ní gbogbo ìtọ̀sọ̀nà. Scale factor kan ọ̀so ọ̀pẹ̀júwe bí ijìnnà ẹ̀ ní gbogbo pẹ̀lú àkókò, ohun èlò jẹ smooth perfect fluid, Hubble parameter H sì summarize ìgbogbo rate. Èyí jẹ idealized abẹ̀lẹ̀, kì í ẹ map individual ìṣùpò ìràwọ̀.

Ẹ̀gbọ̀n àìbámu ìṣètò wà. Friedmann àgbáyé solve Einstein’s equation. Wọ̀n kì í, ní gbogbogbòdò, solve full higher-order GfE equation, tí ó tún track scalar, vector-type àti bivector-type sector àti derivative G-field. Einstein’s equation tún farahàn nìkan nínú first-order, agbára-kékeré àti ìkò-kékeré ààlà proposal.

ìwé ìwádíí nàà sọ èyí taara, ó sì treat Friedmann solution gégẹ̀ bí ìsúnmọ̀, nínú ọ̀nà tí a fi wé fífi mean-field solution sínú fuller àbá-ẹ̀kọ̀ láti ìdánwò ibi tí ìsúnmọ̀ nàà ẹ̀ tó ẹ́é gbẹ̀kẹ̀lé. Regime nàà nílò low agbára àti small ìkò, tí $l_P H \ll 1$ summarize, níbi tí l_P jẹ Planck length. Condition kejì nílò product induced higher-order metric àti inverse physical higher-order metric kí ó dúró positive definite.

Nítorí nàà abajade kì í ẹ “GfE ní predict history Universe wa.” Ó sunmọ̀ sí: **tí GfE àgbáyé bá jẹ sufficiently well approximated nípasẹ̀ familiar Friedmann cosmology, àwọ̀n thermodynamic scaling tí full GfE iye ní fúnni ní wọ̀nyí.**

Abajade local-sí-total

Nínú ipò yẹn, leading agbègbè iye ní simple scaling:

- àwòṣe entropy iwúwo scale gégé bí H^2 ;
- àwòṣe agbára iwúwo scale gégé bí H^4 ;
- fún non-de Sitter Friedmann example ní late àkókò, wọn di nìkan bí t^{-2} àti t^{-4} .

Density méjèjè ní dín kù bí àgbáyé ẹ ní gbooro. Şùgbón iwúwo kì í ẹ total.

Nígba tí iwé iwádíí integrate kojá expanding spacetime agbègbè, iwọn didun tó ní pọ ní yí answer padà. Fún familiar ohun èlò-dominated àti radiation-dominated example, entropy àpapọ ní pọ pẹlú àkókò bí entropy per unit iwọn didun tilẹ ní dín kù. Total agbára kò máa pọ sí i tíí; ní ipele àkókò ó ní sún mó constant.

Èyí ni conceptual èsì tó wúlò jù nínú iwé iwádíí. Local ordering tàbí dilution kò gbọdọ tako global second law. Region kan lè ní entropy per unit iwọn didun tó dín kù ní agbègbè, nígbà tí entropy àpapọ ní pọ nítorí spacetime iwọn didun ní gbooro yára ju.

Calculation kò fídí múlẹ pé èyí ni microscopic explanation tó tọ fún thermodynamic arrow nínú Universe gidi. Ó fi hàn pé proposed àgbékalẹ lè gba local-global split yí láí sí ìtakora nínú Friedmann isúnmọ rẹ.

Àfiwé de Sitter, pẹlú iwọn ooru tó yàtò

iwé iwádíí nàà tún wo de Sitter space, idealized exponentially expanding spacetime pẹlú constant H . Fún observer kan soṣo, ó integrate nínú **causal diamond** finite nìkan: overlap láàárín future light cone ti earlier isẹlẹ àti past light cone ti later isẹlẹ, tí ó bound spacetime agbègbè tí ó lè participate nínú observation láàárín wọn. Kojá diamond yẹn, total GfE entropy scale gégé bí H^{-2} , H-scaling kan nàà bí familiar Gibbons-Hawking entropy. Total GfE agbára jẹ order ọkan nínú unit àwòṣe.

Ìdílẹ cosmological background kan

FRW jẹ family homogeneous àti isotropic jíọmẹtrì, kì í ẹ ibi mǐràn. Matter-dominated àti radiation-dominated àgbáyé jẹ FRW ọràn tí ohun tó kún àwòṣe yà wọn sọtò. De Sitter space tún lè jẹ written ní FRW form, şùgbón ó dúró fún vacuum-dominated ọràn pẹlú constant H àti exponential ìgbooro. Causal diamond jẹ finite agbègbè tí a yan nínú spacetime yẹn fún observer kan; kì í ẹ irú àgbáyé mǐràn.

Matching scaling kan kì í ẹ ohun kan nàà pẹlú deriving kan nàà physical object. GfE k-iwọn ooru tó bá a mu scale gégé bí H^2 , yàtò sí standard de Sitter iwọn ooru tí scale gégé bí H . iwé iwádíí interpret iyàtò yí gégé bí ẹrì pé k-iwọn ooru jẹ ti spacetime jíọmẹtrì dípò quantum field tó ní gbé lórí abẹlẹ yẹn.

Lẹyìn nàà ó daba pé iwọn ooru bẹẹ lè ni relation pẹlú graviton radiation dípò ordinary particle emission. Èyí jẹ future ibèèrè, kì í ẹ èsì iwé iwádíí yí. A ó kọkọ ní láti quantize àbá-ẹkọ nàà kí a tó lè fídí múlẹ bóyá iwọn ooru rẹ bá radiation mu rárá.

Ohun tí èyí kò fi hàn

- Kò fi observation hàn pé agbára walè emerge láti entropy.
- Kò fidí múlè pé effective term àwòṣe náà ni dark agbára tí cosmology measure.
- Kò rọ̀pò gbogbogbò relativity pèlú superior àbá-ẹ̀kọ́ tí a ti idánwò. General relativity farahàn níbí gégé bí agbára-kékeré, ìkò-kékeré ààlà proposal.
- Kò mú Friedmann cosmology di ojútúú gangan GfE. Wọn jẹ isúnmọ́ tí a lò láti ìṣíró àfojúsùn thermodynamic ìhùwàsí àwòṣe.
- Kò derive complete microscopic count ti spacetime degree of freedom.
- Kò fúnni ní quantum-gravity àbá-ẹ̀kọ́ tó ti parí tàbí detect graviton.
- Kò fi hàn pé negative k-ìwọn oorú jẹ ordinary negative ẹ̀rọ ìwọn oorú reading.

Báwo ni abajade náà ẹ̀ lágbara tó?

Èyí jẹ peer-reviewed ti àbá-ẹ̀kọ́ iwé iwádíí, nítorí náà “ẹ̀rí” túmọ́ sí nkan tó yàtò sí idánwò. Ìbèèrè tó yẹ ni bóyá definition coherent, bóyá derivation tẹ̀lẹ̀, àti bóyá isúnmọ́ jẹ stated àti controlled.

Ní ipele yẹn, iwé iwádíí náà fúnni ní concrete thermodynamic dictionary fún GfE, ó sì derive first-law ìṣètò dípò gbìgbẹ̀kẹ̀lẹ̀ analogy nìkan. Ó tún mú ààlà isúnmọ́ hàn kedere gan-an: Friedmann solution jẹ borrowed láti gbogbogbò relativity, inserted sínú GfE iye, tí a sì restrict sí ipò níbí tí induced metric dúró well behaved.

Àwọn physical claim tó tóbi ẹ́i sí. Framework náà jẹ tuntun, iwé iwádíí yí kò fi cosmology rẹ wé dátà, diẹ lára implication tó nífẹ́ ẹ́i jù — quantization, contact-geometric dynamics àti ẹ́e ẹ́e graviton radiation — jẹ ìtọ̀sọ̀nà future ẹ́ẹ. Internal consistency jẹ necessary fún tuntun agbára walè àbá-ẹ̀kọ́. Kò tó láti fi hàn pé àbá-ẹ̀kọ́ náà Ẹ̀pẹ̀júwe nature.

Ìdí tí ó fi ẹ̀ pàtàkì

Relation lááárín agbára walè àti thermodynamics ti pé tó sì jinlẹ̀, láti black-hole entropy sí ìwọn oorú de Sitter space. Ọ̀pọ̀ ẹ̀sì wònyí organized yí horizon ká. GfE dípò bẹ̀ ń gbìyànjú láti kọ agbègbè, volumetric information measure taara láti relation ohun èlò àti jíọmétrì.

Bóyá proposal yẹn yóò yẹ jẹ open ìbèèrè. Sùgbón thermodynamic exercise náà fi useful target kan hàn fún àbá-ẹ̀kọ́ irú yẹn: ó yẹ kí ó Ẹ̀làyé bí agbègbè ìṣètò àti falling agbègbè entropy iwúwo ẹ̀ lẹ̀ wà pò pèlú increasing entropy àpapọ̀ nínú expanding agbáyé.

iwé iwádíí yí fi mathematically explicit way kan hàn tí èyí fi lẹ̀ ẹ̀lẹ̀. Iye rẹ̀ kì í ẹ̀ pé ó ti pa gravity-entropy ìṣòro dé. Ó yí apá kan ti ìṣòro náà sí equation tí assumption, ààlà àti next idánwò rẹ̀ lẹ̀ sọ kedere.

Àkótán mímó

Bianconi derive àpejuwe thermodynamics nínú Gravity From Entropy, proposed modified-gravity àgbékalè tó dá lóri geometric quantum entropy ibatan. Local entropy, agbára, ìwọn ooru àti titẹ variable àwòṣe obey first law. Nígbà tí full GfE iye bá evaluate lóri agbára-kékeré, ìkò-kékeré Friedmann isúnmó, agbègbè entropy àti agbára ìwúwo ní dín kù bí àgbáyé ṣe ní gbooro, nígbà tí entropy àpapọ ní pọ nítorí spacetime ìwọn didun ní gbooro; total agbára ní sún mó constant ní ìpele àkókó fún ohun èlò- àti radiation-dominated example. De Sitter causal diamond fún entropy scaling gégé bí H^{-2} , ṣùgbón àwòṣe ìwọn ooru yàtò sí standard horizon ìwọn ooru. Àwọn wònyí jé conditional mathematical èsì nínú GfE, kì í ṣe observational èrí pé agbára walẹ wá láti entropy, measurement dark agbára, tàbí completed quantum-gravity àbá-ẹkọ.

Àwọn orísun

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