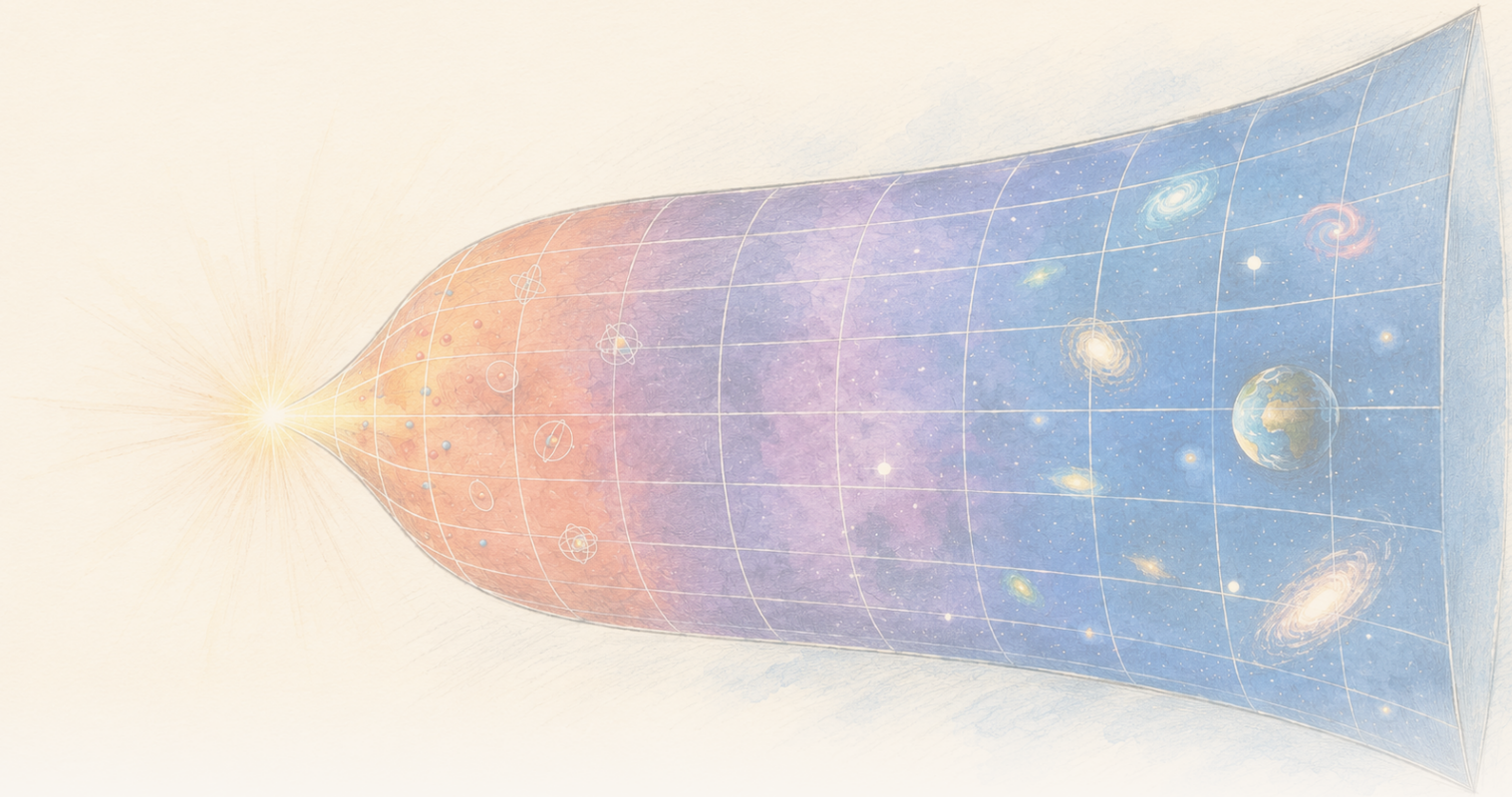

The Clean Paper

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

Ndani ya mfano wa mvuto unaotegemea entropia, msongamano wa entropia wa mahali hupungua huku jumla yake ikiongezeka

Makala katika Physical Review D inatoa joto, shinikizo na sheria ya kwanza ndani ya Gravity From Entropy, mfumo uliopendekezwa wa mvuto uliorekebishwa. Katika ukadiriaji wa Friedmann wa nyakati za baadaye, nishati ndogo na mpindano mdogo, msongamano wa entropia na nishati wa mahali katika mfano hupungua huku upanuzi ukifanya entropia ya jumla iongezeke. Hesabu ni thabiti ndani ya mfumo wenyewe, lakini ina masharti: kosmolojia za Friedmann si suluhisho kamili za nadharia nzima, na huu si ushahidi wa uchunguzi kwamba mvuto unatokana na entropia, maelezo ya nishati ya giza iliyopimwa au nadharia iliyokamilika ya mvuto wa kwanta.

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

Ujazo unaoongezeka unaweza kupunguza msongamano huku ukiongeza jumla

Ikiwa msongamano wa entropia katika mfano huu unapungua kadiri ulimwengu unavyopanuka, entropia yake ya jumla inawezaje kuendelea kuongezeka?

Fikiria ulimwengu unaopanuka ukiwa umegawanywa katika vijisanduku vidogo. Kiasi cha kitu katika kila kijisanduku kinaweza kupungua hata wakati kiasi cha jumla katika eneo linaloongezeka kinapanda. Kupungua kwa msongamano na kuongezeka kwa jumla si mambo yanayopingana ikiwa ujazo wenyewe unabadilika.

Tatizo hilo rahisi la uhasibu ndilo lililo katikati ya makala ya kinadharia yenye lengo kubwa zaidi. Katika Physical mapitio D, mwanafizikia wa hisabati Ginestra Bianconi anaendeleza maelezo ya kitermodinamiki ya **Gravity From Entropy** (GfE), mfano uliopendekezwa hivi karibuni ambamo mvuto huwakilishwa kupitia uhusiano wa kinadharia wa taarifa kati ya maada na jiometria. Hapa, "wa kinadharia wa taarifa" humaanisha kwamba mfano huanzia kwenye kipimo cha kihesabu cha jinsi maelezo mawili ya jiometria yanavyotofautiana: jiometria ya kimwili na ile inayosababishwa na maada na mpindano.

Makala inatoa kiasi cha mahali kinachoitwa k-entropia, k-nishati, k-joto na k-shinikizo. Kiambishi k hutenganisha sekta tofauti za kijiometria katika mfano; si vitu tofauti wala enzi tofauti za ulimwengu. Uhusiano wake wa sheria ya kwanza una muundo uleule wa uhasibu kama katika termodinamiki: mabadiliko ya nishati yanahusiana na joto mara mabadiliko ya entropia, ukitoa shinikizo mara mabadiliko ya ujazo.

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

Kisha makala inakokotoa kiasi hicho kwa kutumia kosmolojia za Friedmann zinazopanuka: ulimwengu sanifu uliorahisishwa ambao kwa kiwango kikubwa una sifa sawa kila mahali na katika kila mwelekeo. Katika hali ya nishati ndogo na mpindano mdogo, mifano inayotawaliwa na maada na mionzi ina msongamano wa entropia na nishati wa mahali unaopungua, lakini upanuzi huongeza ujazo kiasi cha kufanya entropia ya jumla iongezeke. Nishati ya jumla hukaribia thamani isiyobadilika katika mpangilio wa kwanza, yaani baada ya kubakiza neno linalotawala kwa muda mrefu na kuacha maneno yanayofifia kwa kasi zaidi kadiri muda unavyopita.

Hilo ni tokeo safi la kihesabu. Mpaka wake ni muhimu vivyo hivyo: hesabu inafanywa **ndani ya nadharia moja iliyopendekezwa**, na kosmolojia za Friedmann zinazotumiwa katika mifano mahususi ni **makadirio**, si suluhisho kamili, za milinganyo yote ya GfE. Milinganyo hiyo ya mwendo hutokana na kubadilisha action iliyopendekezwa ya GfE na inajumuisha uga wa G wenye mienendo pamoja na sekta za kijiometria za daraja la juu ambazo hazipo katika milinganyo ya kawaida ya Friedmann. Makala haiangalii entropia ikizalisha mvuto, haitambui nishati ya giza katika Ulimwengu wetu, wala haikamilishi nadharia ya mvuto wa kwanta.

Gravity From Entropy inadhania nini

Uhusiano wa jumla unaeleza mvuto kupitia jiometria ya anga-wakati. Maada huiambia anga-wakati jinsi ya kupinda, na mpindano huo huiambia maada jinsi ya kusonga. GfE huanzia kwenye action tofauti iliyopendekezwa: inachukulia vitu vinavyohusiana na metriki kama waendeshaji wa kwanta na kujenga Lagrangian yake kutoka kwenye **Geometric Quantum Relative Entropy** (GQRE).

Maneno matatu kwa sekunde 120

Mwendelezaji wa kwanta (quantum operator) ni kanuni ya kihesabu inayotenda juu ya hali ya kwanta na kuwakilisha kiasi au mabadiliko. GfE hudhani kwamba vitu vyake vinavyohusiana na metriki vinaweza kushughulikiwa kwa njia hii; makala haimtaki msomaji ajenge upya ujenzi huo.
Lagrangian ni kanuni fupi ya kihesabu inayobeba mienendo ya nadharia. Ukiijumuisha juu ya anga-wakati unapata action, kisha ukibadilisha action hiyo unapata milinganyo ya uga.
GQRE ni Lagrangian maalumu ya mfano iliyochaguliwa na GfE. Inabadilisha wazo la quantum relative entropy ili kulinganisha metriki ya kimwili na metriki ya daraja la juu inayosababishwa na maada na mpindano. Kuiita entropia hakuifanyi iwe entropia ya kawaida ya joto.

Entropia jamaa kwa kawaida ni kipimo cha jinsi usambazaji wawili wa uwezekano au hali mbili za kwanta zinavyoweza kutofautishwa. Katika GfE, ulinganisho ni kati ya metriki ya kimwili na metriki ya daraja la juu inayosababishwa na maada na mpindano. “Daraja la juu” hapa halimaanishi vipimo vya ziada vya anga-wakati; mfano unakusanya sekta za kijiometria za skala, za aina ya vekta na za aina ya bivekta katika kitu kimoja kilichopanuliwa. **Uga wa G** wenye mienendo huunganisha vipengele hivyo na kubadilisha metriki inayotumiwa katika sehemu za mvuto na maada. Mfumo umeundwa ili katika kikomo cha nishati ndogo na mpindano mdogo, hatua yake ya kifizikia ipungue kuwa action ya Einstein-Hilbert ya uhusiano wa jumla pamoja na action ya maada.

Sentensi hiyo ya mwisho ni rahisi kuisoma kupita kiasi. Kurejesha milinganyo ya Einstein katika kikomo fulani ni lengo la uthabiti wa pendekezo. Hakuonyeshi kwamba asili hutumia nadharia pana zaidi nje ya kikomo hicho.

Milinganyo ya uga ya GfE pia ina neno lenye mienendo ambalo mfumo unaliita **neno linalojitokeza la nishati ya giza yenye ufanisi**. Katika makala hii, Bianconi anatambulisha msongamano wa nishati ya ndani wa mfano na neno hilo. “Nishati ya giza yenye ufanisi” inaeleza jukumu lake katika milinganyo. Si utambulisho wa majaribio na nishati ya giza inayokadiriwa kutoka uchunguzi wa kosmolojia.

Matumizi matatu tofauti ya neno “entropia”

Entropia ya kawaida ya termodinamiki huhesabu ni mipangilio mingapi ya kiwango kidogo inaweza kutoa hali ya kiwango kikubwa. **Quantum relative entropy** hupima jinsi hali mbili za kwanta zinavyoweza kutofautishwa. **GQRE** katika makala hii ni ujenzi maalumu wa kijiometria wa mfano uliochochewa na relative entropy na kutumiwa kama Lagrangian ya mvuto. Majina yanayofanana hayafanyi kiasi hivi viwe kitu kimoja; makala inatoa mahusiano inayotumia

> ndani ya GfE.

Tokeo halisi la kitermodinamiki ndani ya mfano

Makala inaanza katika kiwango cha mfumo wa GfE wenyewe. Kwa kila daraja na aina ya uhuru wa kijiometria, unaoonyeshwa kwa k, inafafanua:

- k-entropia ya mahali kutoka GQRE;
- k-nishati ya mahali kutoka msongamano wa nishati ya ndani wa mfano;
- k-joto linalooana nayo;
- na k-shinikizo.

Kiasi hivi vinatii sheria ya kwanza ya mahali. Kwa alama za makala,

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

Fahirisi k si orodha ya vitu tofauti au enzi tofauti za Ulimwengu. Katika hesabu iliyo sawia kila mahali na kila mwelekeo, inaweka alama kwa vipengele vitano: kipengele kimoja cha skala; vipengele tofauti vya wakati na nafasi kutoka sekta ya aina ya vekta; na vipengele tofauti vya wakati-nafasi na nafasi-nafasi kutoka sekta ya aina ya bivekta. Skala haina fahirisi ya mwelekeo, vipengele vya aina ya vekta hutenganisha mwelekeo wa muda na wa nafasi, na bivekta hujengwa kutoka jozi za mielekeo. Kila sekta inaweza kuwa na joto na shinikizo lake. K-joto pia linaweza kuwa chanya au hasi, kutegemea kipengele husika cha uga wa G.

Haya si majoto yanayopimwa kwa kuweka kipimajoto karibu na upeo wa kosmolojia. Joto la kawaida la uga wa kwanta katika de Sitter hubadilika kwa uwiano wa H: **joto la Gibbons-Hawking** huhusishwa na upeo wa kosmolojia, huku **utupu wa Bunch-Davies** ukiwa hali sanifu ya kwanta isiyobadilika chini ya ulinganifu wa de Sitter, ambayo mahusiano ya uga wake hutoa mwitikio husika wa joto. Makala inavitenganisha wazi vyote viwili na k-joto zake za kijiometria, ambazo katika mfano wa de Sitter hubadilika kwa uwiano wa H^2. Hapa, "joto" ni kigezo cha kitermodinamiki kinachooana na entropia na nishati kama zilivyofafanuliwa na mfano.

Kwa hiyo utambulisho wa sheria ya kwanza ni utoaji halisi, lakini ni **tokeo la ndani**: ukikubali action na ufafanuzi wa GfE, muundo huu wa kitermodinamiki unafuata.

Kwa nini hesabu ya Friedmann ni makadirio

Ili kugeuza urasmi kuwa mfano wa kosmolojia, makala hutumia anga-wakati za Friedmann-Robertson-Walker (FRW) zilizo sawia kila mahali na kila mwelekeo. "Sawa kila mahali" humaanisha kwamba mfano wa kiwango kikubwa una wastani wa sifa zilezile katika kila eneo; "sawa kila

mwelekeo” humaanisha kwamba unaonekana sawa katika kila upande. Kigezo kimoja cha skeli kinaeleza jinsi umbali unavyoongezeka kwa muda, maada inawakilishwa kama fluidi bora laini, na kigezo cha Hubble H kinafupisha kasi ya upanuzi. Huu ni usuli uliorahisishwa, si ramani ya galaksi moja moja.

Lakini kuna kutolingana kwa kimuundo. Ulimwengu wa Friedmann hutatua milinganyo ya Einstein. Kwa ujumla hautatui milinganyo kamili ya GfE ya daraja la juu, ambayo pia hufuata sekta za skala, aina ya vekta na aina ya bivekta pamoja na derivatives za uga wa G. Milinganyo ya Einstein hurudi tu katika kikomo cha daraja la kwanza, nishati ndogo na mpindano mdogo cha pendekezo.

Makala inasema hilo moja kwa moja na kuyachukulia suluhisho za Friedmann kama makadirio, kwa mbinu inayolinganishwa na kuingiza suluhisho la uga-wastani katika nadharia kamili zaidi ili kupima ni wapi makadirio hayo yanaendelea kuaminika. Hali hiyo inahitaji nishati ndogo na mpindano mdogo, unaofupishwa na $l_P H \ll 1$, ambapo l_P ni urefu wa Planck. Sharti la pili linataka zao la metriki ya daraja la juu iliyosababishwa na kinyume cha metriki ya kimwili ya daraja la juu libaki chanya kwa maana ya kihesabu (positive definite).

Kwa hiyo tokeo si “GfE inatabiri historia ya Ulimwengu wetu.” Liko karibu zaidi na hili: **ikiwa ulimwengu wa GfE unakadiriwa vizuri vya kutosha na kosmolojia inayojulikana ya Friedmann, hizi ndizo skeli za kitermodinamiki zinazotolewa na kiasi kamili cha GfE.**

Tokeo la mahali dhidi ya jumla

Ndani ya hali hiyo, kiasi kikuu cha mahali kina skeli rahisi:

- msongamano wa entropia wa mfano hubadilika kama H^2;
- msongamano wa nishati wa mfano hubadilika kama H^4;
- kwa mifano ya Friedmann isiyo ya de Sitter katika nyakati za baadaye, hizo huwa takriban t^{-2} na t^{-4}.

Kwa hiyo misongamano yote miwili hupungua kadiri ulimwengu unavyopanuka. Lakini msongamano si jumla.

Makala inapojumuisha kiasi juu ya eneo la anga-wakati linalopanuka, ujazo unaokua hubadilisha jibu. Kwa mifano inayojulikana ya kimwili inayotawaliwa na maada na mionzi, entropia ya jumla huongezeka kwa muda hata wakati entropia kwa kila kitengo cha ujazo inapungua. Nishati ya jumla haiendelei kuongezeka; katika mpangilio wa kwanza hukaribia thamani isiyobadilika.

Hili ndilo tokeo la kimawazo lenye manufaa zaidi katika makala. Kuongezeka kwa mpangilio wa mahali au kupungua kwa msongamano hakupingani moja kwa moja na sheria ya pili ya kimataifa. Eneo linaweza kuwa na entropia ndogo zaidi kwa kila kitengo cha ujazo huku entropia iliyojumuishwa ikiongezeka kwa sababu ujazo wa anga-wakati unakua kwa kasi zaidi.

Hesabu hiyo haithibitishi kwamba huu ndio ufafanuzi sahihi wa kiwango kidogo wa mshale wa kitermodinamiki katika Ulimwengu halisi. Inaonyesha kwamba mfumo uliopendekezwa unaweza

kuruhusu mgawanyiko huu wa mahali na jumla bila mkanganyiko ndani ya makadirio yake ya Friedmann.

Ulinganisho wa de Sitter, wenye joto tofauti

Makala pia inazingatia anga ya de Sitter, anga-wakati uliorahisishwa unaopanuka kwa namna ya eksponenti na wenye H isiyobadilika. Kwa mwangalizi mmoja inajumuisha tu juu ya **almasi ya kisababishi (causal diamond)** yenye ukubwa wenye kikomo: mwingiliano kati ya koni ya mwanga ya baadaye ya tukio la awali na koni ya mwanga ya zamani ya tukio la baadaye, ambayo huweka mpaka wa eneo la anga-wakati linaloweza kushiriki katika uchunguzi kati ya matukio hayo. Juu ya almasi hiyo, entropia ya jumla ya GfE hubadilika kama H^{-2}, skeli ileile ya H kama entropia inayojulikana ya Gibbons-Hawking. Nishati ya jumla ya GfE ni ya mpangilio wa moja katika vitengo vya mfano.

> **Familia moja ya usuli wa kosmolojia**
>
> FRW ni familia ya jiometria zilizo sawia kila mahali na kila mwelekeo, si mahali pengine pa ziada. Ulimwengu unaotawaliwa na maada na ule unaotawaliwa na mionzi ni visa vya FRW vinavyotofautishwa na kile kinachojaza mfano. Anga ya de Sitter pia inaweza kuandikwa katika umbo la FRW, lakini inawakilisha hali inayotawaliwa na utupu yenye H isiyobadilika na upanuzi wa eksponenti. Almasi ya kisababishi ni eneo lenye ukubwa wenye kikomo lililochaguliwa ndani ya anga-wakati hiyo kwa mwangalizi mmoja; si aina nyingine ya ulimwengu.

Kulingana kwa skeli si sawa na kutoa kitu kilekile cha kimwili. K-joto husika la GfE hubadilika kama H^2, tofauti na joto la kawaida la de Sitter, ambalo hubadilika kama H. Makala inatafsiri tofauti hii kama ushahidi kwamba k-joto huhusiana na jiometria ya anga-wakati badala ya uga za kwanta zinazoishi juu ya usuli huo.

Kisha inapendekeza kwamba joto kama hilo *huenda* likahusiana na mionzi ya gravitoni badala ya utoaji wa chembe za kawaida. Hilo ni swali la baadaye, si tokeo la makala hii. Nadharia ingehitaji kwanza kufanywa ya kwanta ili kubaini kama joto zake zinahusiana na mionzi hata kidogo.

Hili halithibitishi nini

- **Halionyeshi kwa uchunguzi** kwamba mvuto hujitokeza kutoka entropia.
- **Halibainishi** kwamba neno lenye ufanisi la mfano ndilo nishati ya giza inayopimwa katika kosmolojia.
- **Halibadilishi** uhusiano wa jumla kwa nadharia bora iliyothibitishwa. Uhusiano wa jumla unaonekana hapa kama kikomo cha nishati ndogo na mpindano mdogo cha pendekezo.
- **Halifanyi** kosmolojia za Friedmann kuwa suluhisho kamili za GfE. Ni makadirio yanayotumiwa kukadiria tabia ya kitermodinamiki ya mfano.

- **Halitoi** hesabu kamili ya kiwango kidogo ya viwango vya uhuru vya anga-wakati.
- **Halitoi** nadharia iliyokamilika ya mvuto wa kwanta wala kugundua gravitoni.
- **Halionyeshi** kwamba k-joto hasi ni usomaji wa kawaida hasi wa kipimajoto.

Tokeo lina nguvu kiasi gani?

Hii ni makala ya kinadharia iliyopitiwa na wataalamu, kwa hiyo "ushahidi" una maana tofauti hapa na katika jaribio. Maswali yanayofaa ni kama ufafanuzi una mantiki, kama utoaji wa kihesabu unafuata, na kama makadirio yameelezwa na kudhibitiwa.

Katika kiwango hicho, makala inatoa kamusi mahsusi ya kitermodinamiki kwa GfE na inatoa muundo wa sheria ya kwanza badala ya kutegemea mlinganisho pekee. Pia inaweka mpaka wa makadirio wazi isivyo kawaida: suluhisho za Friedmann hukopwa kutoka uhusiano wa jumla, huingizwa katika kiasi cha GfE na huzuiwa katika hali ambapo metriki iliyosababishwa inaendelea kuwa na tabia nzuri.

Madai makubwa zaidi ya kimwili bado yako wazi. Mfumo ni mpya, makala hii hailinganisha kosmolojia yake na data, na baadhi ya athari zake zinazovutia zaidi — kuifanya kuwa ya kwanta, mienendo ya contact geometry na uwezekano wa mionzi ya gravitoni — zinawasilishwa kama mielekeo ya kazi ya baadaye. Uthabiti wa ndani ni lazima kwa nadharia mpya ya mvuto. Hautoshi kuonyesha kwamba nadharia inaeleza asili.

Kwa nini ni muhimu

Uhusiano kati ya mvuto na termodinamiki ni wa zamani na wa kina, kuanzia entropia ya mashimo meusi hadi joto la anga ya de Sitter. Matokeo mengi kati ya hayo yamejengwa kuzunguka upeo. GfE badala yake inajaribu kujenga kipimo cha taarifa cha mahali na cha ujazo moja kwa moja kutoka uhusiano kati ya maada na jiometria.

Ikiwa pendekezo hilo litaendelea kusimama ni swali wazi. Lakini zoezi la kitermodinamiki linaonyesha lengo muhimu kwa nadharia yoyote kama hiyo: inapaswa kueleza jinsi muundo wa mahali na msongamano wa entropia wa mahali unaopungua vinavyoweza kuishi pamoja na entropia ya jumla inayoongezeka katika ulimwengu unaopanuka.

Makala hii inaonyesha njia moja iliyo wazi kihesabu ambayo hilo linaweza kutokea. Thamani yake si kwamba inafunga tatizo la mvuto na entropia. Inageuza sehemu ya tatizo hilo kuwa milinganyo ambayo dhana, mipaka na majaribio yanayofuata yanaweza kusemwa wazi.

Muhtasari safi

Bianconi anatoa maelezo ya kitermodinamiki ndani ya Gravity From Entropy, mfumo uliopendekezwa wa mvuto uliorekebishwa unaotegemea entropia jamaa ya kwanta ya kijiometria. Vigezo vya mfano vya entropia, nishati, joto na shinikizo vya mahali vinatii sheria ya kwanza. Kiasi kamili cha GfE kinapokokotolewa katika makadirio ya Friedmann ya nishati ndogo na mpindano mdogo, misongamano ya entropia na nishati ya mahali hupungua kadiri ulimwengu unavyopanuka, huku entropia ya jumla ikiongezeka kwa sababu ujazo wa anga-wakati unakua; nishati ya jumla hukaribia thamani isiyobadilika katika mpangilio wa kwanza kwa mifano inayotawaliwa na maada na mionzi. Almasi ya kisababishi ya de Sitter hutoa skeli ya entropia ya H^{-2}, lakini joto la mfano ni tofauti na joto la kawaida la upeo. Haya ni matokeo ya kihesabu yenye masharti ndani ya GfE, si ushahidi wa uchunguzi kwamba mvuto unatokana na entropia, kipimo cha nishati ya giza au nadharia iliyokamilika ya mvuto wa kwanta.

Vyanzo

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