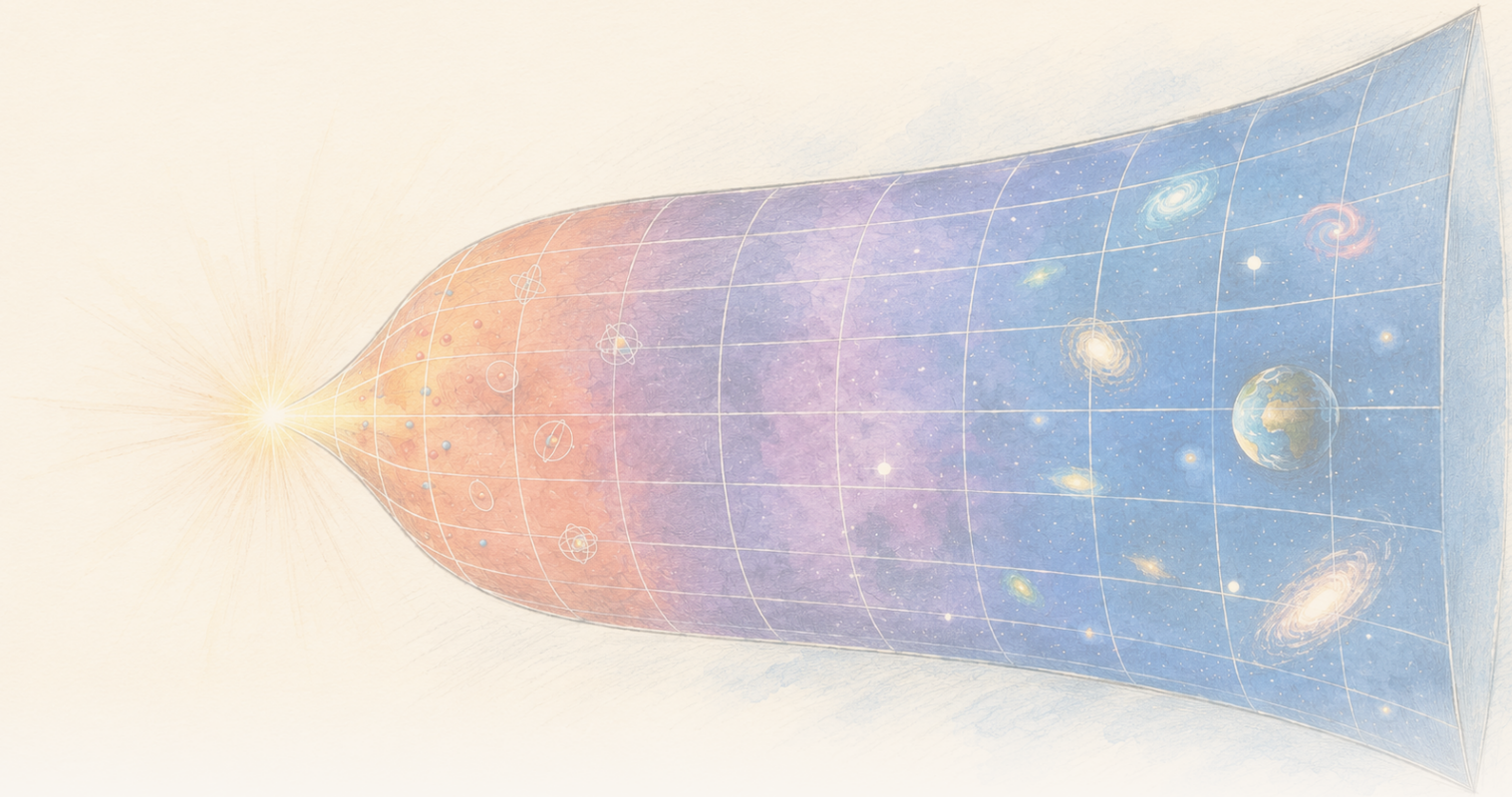

The Clean Paper

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

Entropiyaya əsaslanan qravitasiya modelində lokal entropiya sıxlığı azalır, ümumi entropiya isə artır

Physical Review D məqaləsi təklif olunmuş modifikasiya edilmiş qravitasiya çərçivəsi Gravity From Entropy daxilində temperatur, təzyiq və birinci qanun çıxarır. Gec zaman, aşağı əyrilikli Fridman yaxınlaşmasında modelin lokal entropiya və enerji sıxlıqları azalır, genişlənmə isə ümumi entropiyanı artırır. Hesablama daxili baxımdan konkretdir, amma şərtidir: Fridman kosmologiyaları tam nəzəriyyənin dəqiq həlləri deyil və bu, qravitasiyanın entropiyadan yarandığına müşahidə sübutu, ölçülən qaranlıq enerjinin izahı və ya tamamlanmış kvant-qravitasiya nəzəriyyəsi deyil.

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

Böyüyən həcm sıxlığı azalda, ümumi miqdarı isə artıra bilər

Bu modeldə kainat genişləndikcə entropiya sıxlığı azalırsa, ümumi entropiya necə arta bilər?

Genişlənən kainatı xırda hüceyrələrə bölünmüş kimi təsəvvür edin. Hər hüceyrədə nəyinsə miqdarı azala bilər, amma böyüyən bölgənin bütünündə ümumi miqdar yenə də arta bilər. Həcm özü dəyişirsə, sıxlığın azalması ilə ümumi miqdarın artması bir-birinə zidd deyil.

Bu sadə hesab məsələsi xeyli daha iddialı nəzəri məqalənin mərkəzində dayanır. Physical Review D-də riyazi fizik Ginestra Bianconi **Gravity From Entropy** (GfE) — qravitasiyanın maddə ilə həndəsə arasındakı informasiya-nəzəri əlaqə vasitəsilə kodlaşdırıldığı yaxınlarda təklif edilmiş model — üçün termodinamik təsvir qurur. Burada "informasiya-nəzəri" o deməkdir ki, model həndəsənin iki təsvirinin — fiziki həndəsənin və maddə ilə əyriliyin yaratdığı həndəsənin — nə qədər fərqləndiyini ölçən riyazi kəmiyyətdən başlayır.

Məqalə k-entropiyalar, k-enerjilər, k-temperaturlar və k-təzyiqlər adlandırılan lokal kəmiyyətlər çıxarır. k prefiksi modeldəki müxtəlif həndəsi sektorları bir-birindən ayırır; bunlar müxtəlif maddələr və ya kosmik dövrlər deyil. Onların birinci qanun əlaqəsi termodinamikadakı eyni hesabat formasına malikdir: enerjidə dəyişiklik temperaturun entropiyadakı dəyişikliyə hasilinə, ondan təzyiqin həcmdəki dəyişikliyə hasilinin çıxılmasına bağlıdır.

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

Sonra məqalə bu kəmiyyətləri genişlənən Fridman kosmologiyalarında hesablayır: bunlar böyük miqyasda homogen və izotrop olan standart ideallaşdırılmış kainatlardır. Aşağı enerji və kiçik əyrilik rejimində maddənin və radiasiyanın üstünlük təşkil etdiyi nümunələrdə lokal entropiya və enerji sıxlıqları azalır, amma genişlənmə ümumi entropiyanın artması üçün kifayət qədər həcm yaradır. Ümumi enerji aparıcı tərtibdə sabitə yaxınlaşır; yəni böyük zamanlarda dominant olan termin saxlanılır, zaman artdıqca daha sürətlə sönən terminlər isə nəzərə alınmır.

Bu, aydın riyazi nəticədir. Onun sərhədi də eyni dərəcədə vacibdir: hesablama **təklif edilmiş bir nəzəriyyənin daxilində** aparılır və konkret nümunələrdə istifadə olunan Fridman kosmologiyaları tam GfE tənliklərinin dəqiq deyil, yalnız **təxmini** həlləridir. Həmin hərəkət tənlikləri təklif olunan GfE təsirinin variasiyasından alınır və adi Fridman tənliklərində olmayan dinamik G-sahəsini və daha yüksək tərtibli həndəsi sektorları da ehtiva edir. Məqalə entropiyanın qravitasiya yaratdığını müşahidə etmir, Kainatımızdakı qaranlıq enerjini müəyyənləşdirmir və kvant qravitasiyası nəzəriyyəsini tamamlamır.

Gravity From Entropy nəyi fərz edir

Ümumi nisbilik qravitasiyanı fəza-zamanın həndəsəsi ilə təsvir edir. Maddə fəza-zamana necə əyilməli olduğunu, həmin əyrilik isə maddəyə necə hərəkət etməli olduğunu "deyir". GfE

başqa cür təklif olunan təsirdən başlayır: metriklə əlaqəli obyektləri kvant operatorları kimi qəbul edir və Laqranjianını **Geometrik Kvant Nisbi Entropiyasından** (GQRE) qurur.

120 saniyədə üç termin

Kvant operatoru kvant halına təsir edən və bir kəmiyyəti və ya çevrilməni təmsil edən riyazi qaydadır. GfE metriklə əlaqəli obyektlərinin bu şəkildə işlənə biləcəyini fərz edir; bu məqalə oxucudan həmin konstruksiyanı yenidən qurmağı tələb etmir.
Laqranjian nəzəriyyənin dinamikasını yığcam şəkildə müəyyən edən riyazi reseptdir. Onu fəza-zaman üzrə inteqrasiya etməklə təsir alınır, sonra sahə tənliklərini çıxarmaq üçün bu təsir variasiya olunur.
GQRE GfE-də seçilmiş modeləxas Laqranjiandır. O, fiziki metriki maddə və əyriliyin yaratdığı daha yüksək tərtibli metriklə müqayisə etmək üçün kvant nisbi entropiyası ideyasını uyğunlaşdırır. Onun "entropiya" adlanması onu adi istilik entropiyası etmir.

Nisbi entropiya adətən iki ehtimal paylanmasının və ya kvant halının bir-birindən nə dərəcədə fərqləndiyini ölçür. GfE-də müqayisə fiziki metriklə maddə və əyriliyin yaratdığı daha yüksək tərtibli metrik arasındadır. "Daha yüksək tərtibli" əlavə fəza-zaman ölçüləri demək deyil. Bu, modelin skalyar, vektor-tipli və bivektor-tipli həndəsi sektorları bir genişləndirilmiş obyekt daxilində toplaması deməkdir. Dinamik **G-sahəsi** bu komponentləri bir-biri ilə əlaqələndirir və modelin həm qravitasiya, həm də maddə hissələrində istifadə olunan metriki "geyindirir". Çərçivə elə qurulub ki, aşağı enerji və kiçik əyrilik limitində onun təsiri ümumi nisbiliyin Eynşteyn–Hilbert təsirinə və maddə təsirinə qədər sadələşir.

Son cümləni lazım olduğundan artıq mənalandırmaq asandır. Müəyyən limitdə Eynşteyn tənliklərinin bərpa olunması təklif üçün uyğunluq hədəfidir. Bu, təbiətin həmin limitdən kənarda daha böyük nəzəriyyədən istifadə etdiyini göstərmir.

GfE sahə tənliklərində çərçivənin **ortaya çıxan effektiv qaranlıq-enerji termini** adlandırdığı dinamik termin də var. Bu məqalədə Bianconi modelin daxili enerji sıxlığını həmin terminlə eyniləşdirir. "Effektiv qaranlıq enerji" onun tənliklərdəki rolunu təsvir edir. Bu, kosmoloji müşahidələrdən çıxarılan qaranlıq enerji ilə empirik eyniləşdirmə deyil.

"Entropiya" sözünün üç fərqli istifadəsi

Adi termodinamik entropiya makroskopik halı yarada bilən mikroskopik düzülüşlərin sayını xarakterizə edir. **Kvant nisbi entropiyası** iki kvant halının nə dərəcədə fərqləndirilə bildiyini ölçür. Bu məqalədəki **GQRE** isə nisbi entropiyadan ilhamlanan və qravitasiya Laqranjianı kimi istifadə edilən modeləxas həndəsi konstruksiyadır. Adların oxşarlığı bu kəmiyyətləri bir-birinin əvəzi etmir; məqalə istifadə etdiyi əlaqələri GfE daxilində çıxarır.

Model daxilindəki dəqiq termodinamik nəticə

Məqalə əvvəlcə GfE çərçivəsinin öz səviyyəsində işləyir. k indeksi ilə işarələnən hər həndəsi sərbəstlik dərəcəsi tərtibi və tipi üçün aşağıdakılar müəyyən edilir:

- GQRE-dən lokal k-entropiya;
- modelin daxili enerji sıxlığından lokal k-enerji;
- ona qoşma k-temperatur;
- və k-təzyiq.

Bu kəmiyyətlər lokal birinci qanuna tabedir. Məqalənin işarələnməsində,

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

k indeksi müxtəlif maddələrin və ya Kainat dövrlərinin siyahısı deyil. Homogen və izotrop hesablamada o, beş elementi işarələyir: bir skalyar element; vektor-tipli sektordan ayrıca zamanabənzər və fəzayabənzər elementlər; və bivektor-tipli sektordan ayrıca zaman–fəza və fəza–fəza elementləri. Skalyarın istiqamət indeksi yoxdur, vektor-tipli elementlər zaman istiqamətini fəza istiqamətlərindən ayırır, bivektor isə istiqamət cütlərindən qurulur. Hər sektorun öz temperaturu və təzyiqi ola bilər. Müvafiq G-sahəsi komponentindən asılı olaraq k-temperatur müsbət və ya mənfi də ola bilər.

Bunlar kosmoloji üfüqün yaxınlığına termometr qoymaqla ölçülən temperaturlar deyil. Standart de Sitter kvant-sahə temperaturu H ilə miqyaslanır: **Gibbons–Hawking temperaturu** kosmoloji üfüqə aid edilir, **Bunch–Davies vakuumu** isə sahə korrelyasiyaları müvafiq istilik reaksiyasını verən standart de Sitter-invariant kvant halıdır. Məqalə bunların hər ikisini de Sitter nümunəsində H^2 ilə miqyaslanan həndəsi k-temperaturlarından açıq şəkildə ayırır. Burada “temperatur” modelin entropiya və enerji təriflərindən çıxarılan termodinamik qoşma dəyişəni bildirir.

Beləliklə, birinci qanun eyniliyi real çıxarışdır, amma **daxili nəticədir**: GfE təsirini və təriflərini qəbul etdikdə bu termodinamik quruluş alınır.

Fridman hesablaması niyə təxminidir

Formalizmi kosmoloji nümunəyə çevirmək üçün məqalə homogen və izotrop Fridman–Robertson–Walker (FRW) fəza-zamanlarından istifadə edir. “Homogen” böyük miqyaslı modelin hər yerdə eyni orta xüsusiyyətlərə malik olması, “izotrop” isə hər istiqamətdə eyni görünməsi deməkdir. Tək miqyas faktoru məsafələrin zamanla necə böyüdüyünü təsvir edir, maddə hamar ideal maye kimi göstərilir, Hubble parametri H isə genişlənmə sürətini xülasə edir. Bu, ayrı-ayrı qalaktikaların xəritəsi deyil, ideallaşdırılmış fondur.

Amma burada struktur uyğunsuzluğu var. Fridman kainatları Eynşteyn tənliklərini həll edir.

Onlar, ümumiyyətlə, skalyar, vektor-tipli və bivektor-tipli sektorları, eləcə də G-sahəsinin törəmələrini izləyən tam yüksək tərtibli GfE tənliklərini həll etmir. Eynşteyn tənlikləri yalnız təklifin birinci tərtibli, aşağı enerjili və kiçik əyrilik limitində yenidən ortaya çıxır.

Məqalə bunu birbaşa bildirir və Fridman həllərini təxmin kimi istifadə edir; yanaşma tam nəzəriyyəyə orta-sahə həllini daxil edib həmin təxminin harada etibarlı qaldığını yoxlamağa bənzədilir. Rejim aşağı enerji və kiçik əyrilik tələb edir; bu, $l_P H \ll 1$ ilə ifadə olunur, burada l_P Plank uzunluğudur. İkinci şərt induksiya edilmiş daha yüksək tərtibli metriklə fiziki daha yüksək tərtibli metrikin tərsinin hasilinin müsbət müəyyən qalmasını tələb edir.

Nəticə buna görə "GfE Kainatımızın tarixini proqnozlaşdırır" deyil. Daha düzgün ifadə belədir: **əgər GfE kainatı tanış Fridman kosmologiyası ilə kifayət qədər yaxşı yaxınlaşdırılırsa, tam GfE kəmiyyətləri bu termodinamik miqyaslanmaları verir.**

Lokal və ümumi nəticə

Həmin rejim daxilində aparıcı lokal kəmiyyətlərin sadə miqyaslanmaları var:

- modelin entropiya sıxlığı H^2 kimi miqyaslanır;
- modelin enerji sıxlığı H^4 kimi miqyaslanır;
- gec zamanlarda de Sitter olmayan Fridman nümunələrində bunlar təxminən t^{-2} və t^{-4} olur.

Beləliklə, kainat genişləndikcə hər iki sıxlıq azalır. Amma sıxlıq ümumi miqdar deyil.

Məqalə genişlənən fəza-zaman bölgəsi üzrə inteqrasiya etdikdə böyüyən həcm cavabı dəyişir. Fiziki baxımdan tanış maddə-üstünlüklü və radiasiya-üstünlüklü nümunələrdə vahid həcmə düşən entropiya azalsa da, ümumi entropiya zamanla artır. Ümumi enerji davamlı artmır; aparıcı tərtibdə sabitə yaxınlaşır.

Bu, məqalənin ən faydalı konseptual nəticəsidir. Lokal nizamlanma və ya durulma avtomatik olaraq qlobal ikinci qanunla ziddiyyət yaratmır. Fəza-zaman həcmi daha sürətlə böyüdüyünə görə vahid həcmə düşən entropiya azalarkən inteqrasiya olunmuş entropiya arta bilər.

Bu hesablama real Kainatda termodinamik zaman oxunun düzgün mikroskopik izahının məhz bu olduğunu sübut etmir. O göstərir ki, təklif olunan çərçivə öz Fridman yaxınlaşmasında lokal–qlobal fərqi ziddiyyətsiz şəkildə yerləşdirə bilir.

De Sitter müqayisəsi — amma başqa temperaturla

Məqalə sabit H ilə eksponensial genişlənən ideallaşdırılmış fəza-zaman olan de Sitter fəzasını da nəzərdən keçirir. Bir müşahidəçi üçün inteqrasiya yalnız sonlu **səbəbiyyət almazı** (causal diamond) üzrə aparılır: daha erkən hadisənin gələcək işıq konusu ilə daha gec hadisənin

keçmiş işıq konusunun kəsişməsi, yəni onların arasında müşahidələrdə iştirak edə bilən fəza-zaman bölgəsi. Bu almaz üzrə ümumi GfE entropiyası tanış Gibbons–Hawking entropiyası ilə eyni H-miqyaslanmasına — H^{-2} — malikdir. Model vahidlərində ümumi GfE enerjisi bir tərtibindədir.

> **Kosmoloji fonların bir ailəsi**
>
> FRW ayrıca bir yer deyil, homogen və izotrop həndəsələr ailəsidir. Maddə-üstünlüklü və radiasiya-üstünlüklü kainatlar modeli nə ilə doldurduğuna görə fərqlənən FRW hallarıdır. De Sitter fəzası da FRW formasında yazıla bilər, amma sabit H və eksponensial genişlənmə ilə vakuum-üstünlüklü halı təmsil edir. Səbəbiyyət almazı bir müşahidəçi üçün həmin fəza-zamanda seçilmiş sonlu bölgədir; başqa növ kainat deyil.

Eyni miqyaslanmanı almaq eyni fiziki obyekti çıxarmaq demək deyil. Müvafiq GfE k-temperaturu H^2 kimi miqyaslanır, standart de Sitter temperaturu isə H kimi. Məqalə bu fərqi k-temperaturun həmin fonda yaşayan kvant sahələrinə deyil, fəza-zaman həndəsəsinə aid olduğuna işarə kimi şərh edir.

Sonra belə temperaturun adi hissəcik emissiyasından çox qraviton şüalanması ilə əlaqəli *ola biləcəyini* irəli sürür. Bu, bu məqalənin nəticəsi deyil, gələcək sualdır. Onun temperaturlarının ümumiyyətlə şüalanmaya uyğun gəlib-gəlmədiyini müəyyən etmək üçün əvvəlcə nəzəriyyəni kvantlaşdırmaq lazım olardı.

Bu nəyi sübut etmir

- Qravitasiyanın entropiyadan yarandığını müşahidə yolu ilə **göstərmir**.
- Modelin effektiv termininin kosmologiyada ölçülən qaranlıq enerji olduğunu **müəyyənləşdirmir**.
- Ümumi nisbiliyi sınaqlardan keçmiş daha üstün nəzəriyyə ilə **əvəz etmir**. Ümumi nisbilik burada təklifin aşağı enerji, kiçik əyrilik limiti kimi ortaya çıxır.
- Fridman kosmologiyalarını GfE-nin dəqiq həllərinə **çevirmir**. Onlar modelin termodinamik davranışını qiymətləndirmək üçün istifadə olunan yaxınlaşmadır.
- Fəza-zamanın sərbəstlik dərəcələrinin tam mikroskopik sayını **çıxarmır**.
- Tamamlanmış kvant-qravitasiya nəzəriyyəsi **təqdim etmir** və qravitonları aşkarlamır.
- Mənfi k-temperaturların adi termometrdə mənfi göstəricilər olduğunu **göstərmir**.

Nəticə nə qədər güclüdür?

Bu, resenziyalı nəzəri məqalədir; ona görə burada “sübut” eksperimentdəkindən fərqli məna daşıyır. Uyğun suallar təriflərin tutarlı olub-olmaması, çıxarışların düzgün izlənməsi və yaxınlaşmaların açıq şəkildə bildirilib nəzarətdə saxlanmasıdır.

Bu səviyyədə məqalə yalnız analogiyaya arxalanmaq əvəzinə GfE üçün konkret termodinamik lüğət verir və birinci qanun quruluşunu çıxarır. Yaxınlaşmanın sərhədini də qeyri-adi dərəcədə aydın göstərir: Fridman həlləri ümumi nisbilikdən götürülür, GfE kəmiyyətlərinə daxil edilir və induksiya olunmuş metrikin yaxşı davranış göstərdiyi rejimlə məhdudlaşdırılır.

Daha böyük fiziki iddialar açıq qalır. Çərçivə yenidir, bu məqalə onun kosmologiyasını məlumatlarla müqayisə etmir və ən maraqlı nəticələrindən bəziləri — kvantlaşdırma, kontakt-həndəsi dinamika və mümkün qraviton şüalanması — gələcək tədqiqat istiqamətləri kimi təqdim olunur. Daxili tutarlılıq yeni qravitasiya nəzəriyyəsi üçün zəruridir. Amma nəzəriyyənin təbiəti təsvir etdiyini göstərmək üçün kifayət deyil.

Niyə vacibdir

Qravitasiya ilə termodinamika arasındakı əlaqə qara dəlik entropiyasından de Sitter fəzasının temperaturuna qədər köhnə və dərin mövzudur. Bu nəticələrin çoxu üfüqlər ətrafında qurulur. GfE isə maddə ilə həndəsə arasındakı əlaqədən birbaşa lokal, həcmə yayılmış informasiya ölçüsü qurmağa çalışır.

Bu təklifin sınaqlardan sağ çıxıb-çıxmayacağı açıq sualdır. Amma termodinamik məşq belə nəzəriyyələr üçün faydalı hədəfi üzə çıxarır: onlar genişlənən kainatda lokal quruluş və azalan lokal entropiya sıxlığının artan ümumi entropiya ilə necə yanaşı mövcud ola biləcəyini izah etməlidirlər.

Bu məqalə bunun baş verə biləcəyi riyazi cəhətdən açıq bir yolu göstərir. Onun dəyəri qravitasiya–entropiya problemini bağlamasında deyil. O, problemin bir hissəsini fərziyyələri, sərhədləri və növbəti sınaqları aydın ifadə edilə bilən tənliklərə çevirir.

Təmiz xülasə

Bianconi həndəsi kvant nisbi entropiyasına əsaslanan təklif olunmuş modifikasiya edilmiş qravitasiya çərçivəsi Gravity From Entropy daxilində termodinamik təsvir çıxarır. Modelin lokal entropiya, enerji, temperatur və təzyiq dəyişənləri birinci qanuna tabedir. Tam GfE kəmiyyətləri aşağı enerji və kiçik əyrilikli Fridman yaxınlaşmalarında hesablandıqda, kainat genişləndikcə lokal entropiya və enerji sıxlıqları azalır, fəza-zaman həcminin böyüməsi isə ümumi entropiyanı artırır; maddə- və radiasiya-üstünlüklü nümunələrdə ümumi enerji aparıcı tərtibdə sabitə yaxınlaşır. De Sitter səbəbiyyət almazında entropiya H^{-2} kimi miqyaslanır, amma model temperaturu standart üfüq temperaturundan fərqlənir. Bunlar GfE daxilində şərti riyazi nəticələrdir; qravitasiyanın entropiyadan yarandığına müşahidə sübutu, qaranlıq enerjinin ölçülməsi və ya tamamlanmış kvant-qravitasiya nəzəriyyəsi deyil.

Mənbələr

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