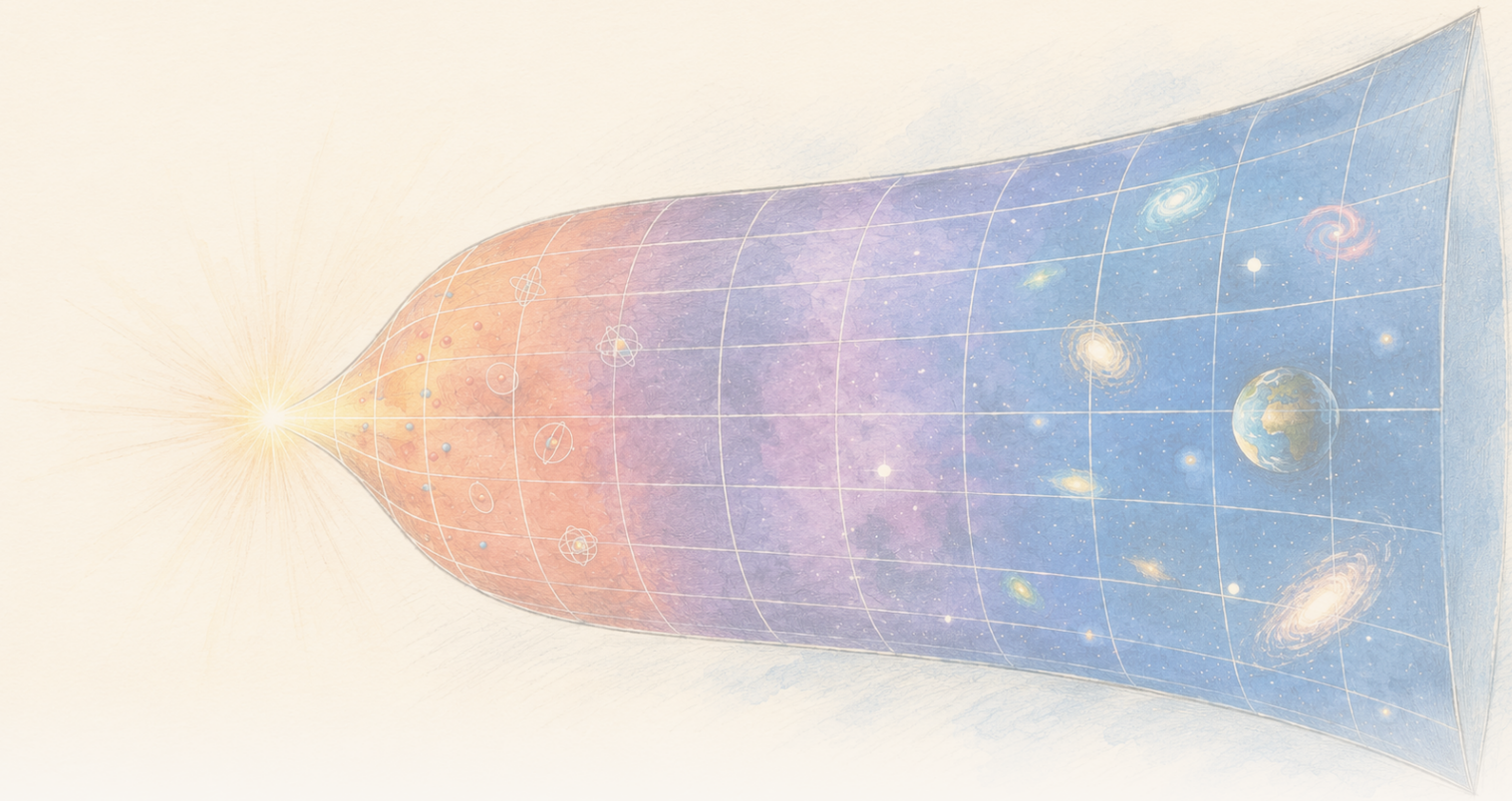

The CLEAN PAPER

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

داخل نموذج للجاذبية قائم على الإنتروبيا، تنخفض كثافة الإنتروبيا المحلية بينما يزداد المجموع

تشتق ورقة في *D Review Physical* درجات حرارة وضغوطاً وقانوناً أول داخل *From Gravity*، *Entropy*، وهو إطار مقترح للجاذبية المعدلة. وفي تقريب *Friedmann* متأخر الزمن ومنخفض الانحناء، تنخفض كثافات الإنتروبيا والطاقة المحلية للنموذج بينما يجعل التمدد الإنتروبيا الكلية ترتفع. الحساب ملموس داخلياً لكنه شرطي: كونيات *Friedmann* ليست حلولاً دقيقة للنظرية الكاملة، وهذه ليست أدلة رصدية على أن الجاذبية تأتي من الإنتروبيا، ولا تفسيراً للطاقة المظلمة المقاسة، ولا نظرية مكتملة للجاذبية الكمومية.

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: 1103/26kn-thgp.10

يمكن لحجم متزايد أن يخفض الكثافة ويرفع المجموع في الوقت نفسه

إذا كانت كثافة الإنتروبيا في هذا النموذج تنخفض مع تمدد الكون، فكيف يمكن لإنتروبيته الكلية أن تزداد؟

تخيل كوناً يتمدد ومقسماً إلى خلايا صغيرة. يمكن أن تنخفض كمية شيء ما في كل خلية بينما ترتفع الكمية الكلية عبر المنطقة الآخذة في النمو. انخفاض الكثافة وارتفاع المجموع ليسا متناقضين عندما يكون الحجم نفسه متغيراً.

تقع هذه المفارقة الحسابية البسيطة في قلب ورقة نظرية أكثر طموحاً بكثير. ففي D Review Physical، تطور عالمة الفيزياء الرياضية Bianconi Ginestra وصفاً ترموديناميكياً لـ**Entropy From Gravity** (GfE)، وهو نموذج مقترح حديثاً تُشفّر فيه الجاذبية من خلال علاقة مستمدة من نظرية المعلومات بين المادة والهندسة. و«مستمدة من نظرية المعلومات» تعني هنا أن النموذج يبدأ من مقياس رياضي لمدى اختلاف وصفين للهندسة: الهندسة الفيزيائية وهندسة أخرى تستحثها المادة والانحناء.

تشتق الورقة كميات محلية تسمى k-entropies وk-energies وk-temperatures وk-pressures. تميز السابقة k قطاعات هندسية مختلفة في النموذج؛ وليست هذه مواد مختلفة أو عصوراً كونية مختلفة. وتأخذ العلاقة بينها الصيغة المألوفة نفسها للقانون الأول في الديناميكا الحرارية: يتغير مقدار الطاقة بمقدار درجة الحرارة مضروبة في تغير الإنتروبيا، مطروحاً منه الضغط مضروباً في تغير الحجم.

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

ثم تقيم الورقة هذه الكميات باستخدام كونيات Friedmann المتمددة: أكوان معيارية مثالية متجانسة ومتساوية الخواص على المقاييس الكبيرة. وفي نظام منخفض الطاقة وصغير الانحناء، تمتلك أمثلة هيمنة المادة وهيمنة الإشعاع كثافات محلية متناقصة من الإنتروبيا والطاقة، لكن التمدد يوفر حجماً كافياً كي ترتفع الإنتروبيا الكلية. وتقترب الطاقة الكلية من ثابت في الرتبة الرائدة، أي بعد الاحتفاظ بالحد المسيطر في الأزمنة الكبيرة وإسقاط الحدود التي تتلاشى أسرع مع مرور الزمن.

هذه نتيجة رياضية واضحة. وحدودها لا تقل أهمية: الحساب يجري **داخل نظرية مقترحة واحدة**، وكونيات Friedmann المستخدمة في الأمثلة الملموسة ليست إلا حلولاً **تقريبية** لا دقيقة لمعادلات GfE الكاملة. تأتي معادلات الحركة هذه من تغيير فعل GfE المقترح وتتضمن مجال G الديناميكي وقطاعات هندسية أعلى رتبة لا تظهر في معادلات Friedmann العادية. ولا ترصد الورقة إنتروبيا تولد الجاذبية، ولا تحدد الطاقة المظلمة في كوننا، ولا تكمل نظرية للجاذبية الكمومية.

ماذا تفترض Entropy؟ From Gravity

تصف النسبية العامة الجاذبية من خلال هندسة الزمكان. تخبر المادة الزمكان كيف ينحني، ويخبر الانحناء المادة كيف تتحرك. تبدأ GfE من فعل مقترح مختلف: تعامل أجساماً مرتبطة بالمتري كمؤثرات كمومية وتبني لاغرانجيانها من **إنتروبيا نسبية كمومية هندسية** (GQRE).

> **ثلاثة مصطلحات في 120 ثانية**
>
> بالمتري المرتبطة أجسامها معاملة إمكان GfE تفترض تحويلاً. أو كمية وتمثل كمومية حالة على تعمل رياضية قاعدة **الكمومي المؤثر** الإنشاء. هذا بناء إعادة القارئ من المقال يطلب ولا الطريقة؛ بهذه

اللاغرانجيان وصف رياضي مضغوط لديناميكيات نظرية ما. بتكامله على الزمكان تحصل على الفعل، ثم بتغيير ذلك الفعل تشتق معادلات المجال.
GQRE هي اللاغرانجيان الخاصة بالنموذج التي اختارتها GfE. وهي تكيف فكرة الإنتروبيا النسبية الكمومية لمقارنة المتري الفيزيائي بمتري أعلى رتبة تستحثه المادة والانحناء. تسمية هذا المقدار «إنتروبيا» لا تجعله إنتروبيا حرارية عادية.

تُستخدم الإنتروبيا النسبية عادة مقياساً لمدى قابلية التمييز بين توزيعين احتماليين أو حالتين كموميتين. وفي GfE، تجري المقارنة بين المتري الفيزيائي ومتري أعلى رتبة تستحثه المادة والانحناء. «أعلى رتبة» لا تعني أبعاداً إضافية للزمكان. بل تعني أن النموذج يجمع، في بنية موسعة واحدة، قطاعاً قياسياً وقطاعات ذات بنية متجهية وأخرى ثنائية المتجه. ويربط **مجال G** ديناميكي هذه المكونات و«يكسو» المتري المستخدم في جزأي الجاذبية والمادة من النموذج. وقد بُني الإطار بحيث يختزل فعله، في حد الطاقة المنخفضة والانحناء الصغير، إلى فعل Einstein-Hilbert للنسبية العامة مع فعل المادة.

من السهل المبالغة في قراءة الجملة الأخيرة. استعادة معادلات Einstein في حد ما هدف اتساق للمقترح. ولا تُظهر أن الطبيعة تستخدم النظرية الأوسع خارج ذلك الحد.

كما تحتوي معادلات مجال GfE على حد ديناميكي يسميه الإطار **حداً فعالاً ناشئاً للطاقة المظلمة**. وفي هذه الورقة، تطابق Bianconi كثافة الطاقة الداخلية للنموذج مع ذلك الحد. عبارة «طاقة مظلمة فعالة» تصف دوره في المعادلات، وليست تعريفاً تجريبياً له مع الطاقة المظلمة المستنتجة من الرصد الكوني.

ثلاثة استخدامات مختلفة لكلمة «إنتروبيا»
مدى تقيس **الكمومية النسبية الإنتروبيا** عيانية. حالة تنتج أن يمكن التي المجهرية الترتيبات عدد تعد **العادية الترموديناميكية الإنتروبيا** ويُستخدم النسبية الإنتروبيا من مستوحى بالنموذج خاص هندسي بناء فهي الورقة هذه في **GQRE** أما كموميتين. حالتين بين التمييز قابلية GfE. داخل تستخدمها التي الروابط تشتق والورقة للتبادل، قابلة الكميات هذه يجعل لا الأسماء تشابه للجاذبية. كلاغرانجيان

النتيجة الترموديناميكية الدقيقة داخل النموذج

تعمل الورقة أولاً على مستوى إطار GfE نفسه. ولكل رتبة ونوع من درجات الحرية الهندسية، المفهرسة بـk، تعرف:

- k-entropy محلية من GQRE؛
- k-energy محلية من كثافة الطاقة الداخلية للنموذج؛
- k-temperature مترافقة؛
- وk-pressure.

تخضع هذه الكميات لقانون أول محلي. وبترميز الورقة:

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

المؤشر k ليس قائمة بمواد مختلفة أو عصور مختلفة من الكون. في الحساب المتجانس ومتساوي الخواص، يميز خمسة مدخلات: مدخلاً قياسياً

واحداً، ومدخلين منفصلين زمنياً ومكانياً من القطاع الشبيه بالمتجه؛ ومدخلين منفصلين زمن-مكان ومكان-مكان من القطاع الشبيه بالثنائي المتجهي. المقدار القياسي لا يحمل مؤشراً اتجاهياً، بينما تميز المدخلات الشبيهة بالمتجه الاتجاه الزمني من الاتجاهات المكانية، ويتكون الثنائي المتجهي من أزواج اتجاهات. ويمكن لكل قطاع أن يحمل درجة حرارته وضغطه الخاصين. كما يمكن أن تكون k-temperature موجبة أو سالبة بحسب مكوّن مجال G المقابل.

هذه ليست درجات حرارة تُقاس بوضع ميزان حرارة قرب أفق كوني. درجة حرارة دي سيتر القياسية في نظرية المجال الكمومي تتناسب مع H: **درجة حرارة Gibbons-Hawking** تُسند إلى الأفق الكوني، بينما **فراغ Bunch-Davies** هو الحالة الكمومية القياسية الثابتة تحت تناظرات دي سيتر التي تعطي ارتباطات حقولها الاستجابة الحرارية المقابلة. تميز الورقة صراحة كليهما من درجات الحرارة الهندسية، k-temperature التي تتناسب مع H^2 في مثال دي سيتر. هنا، تسمية «درجة حرارة» تشير إلى متغير ترموديناميكي مترافق مشتق من تعريفات النموذج للإنتروبيا والطاقة.

إذن علاقة القانون الأول مشتقة فعلاً، لكنها **نتيجة مشروطة بالإطار نفسه**: فإذا قبلنا فعل GfE وتعريفاته، تتبع منها هذه البنية الترموديناميكية.

لماذا حساب Friedmann تقريبي؟

لتحويل الصياغة إلى مثال كوني، تستخدم الورقة زمكانات Friedmann-Robertson-Walker (FRW) المتجانسة ومتساوية الخواص. «متجانس» يعني أن النموذج على المقاييس الكبيرة يملك متوسط الخصائص نفسه في كل موضع؛ و«متساوي الخواص» يعني أنه يبدو نفسه في كل اتجاه. يصف عامل مقياس واحد كيفية نمو المسافات مع الزمن، وتمثل المادة كسائل مثالي أملس، ويلخص معامل Hubble H معدل التمدد. هذه خلفية مثالية، لا خريطة لمجرات منفردة.

لكن هناك عدم تطابق بنيوي. تحل أكوان Friedmann معادلات Einstein. وهي لا تحل عموماً معادلات GfE الأعلى رتبة الكاملة، التي تتتبع أيضاً القطاعات القياسية والشبيهة بالمتجه والثنائي المتجهي ومشتقات مجال G. ولا تظهر معادلات Einstein إلا في حد المقترح من الرتبة الأولى والطاقة المنخفضة والانحناء الصغير.

وتقول الورقة ذلك صراحة، لذلك تتعامل مع حلول Friedmann بوصفها تقريبات؛ أي إنها تُدخل حلاً من نوع المجال المتوسط في نظرية أكمل لتختبر المجال الذي يبقى فيه هذا التقريب موثوقاً. يتطلب النظام طاقة منخفضة وانحناء صغيراً، ويلخص ذلك الشرط $l_P H \ll 1$، حيث l_P طول Planck. ويتطلب شرط ثان أن يظل حاصل ضرب المتري المستحث الأعلى رتبة ومعكوس المتري الفيزيائي الأعلى رتبة موجب التعيين.

لذلك فالنتيجة ليست GfE» تتنبأ بتاريخ كوننا». إنها أقرب إلى: **إذا كان كون GfE يُقرب جيداً بما يكفي بكون Friedmann مألوف، فهذه هي مقاييس الترموديناميك التي تنتجها كميات GfE الكاملة.**

نتيجة المحلي مقابل الكلي

داخل ذلك النظام، تتبع الكميات المحلية الرائدة مقاييس بسيطة:

- كثافة إنتروبيا النموذج تتناسب مع H^2؛
- كثافة طاقة النموذج تتناسب مع H^4؛
- وفي أمثلة Friedmann غير دي سيتر في الأزمنة المتأخرة، تصبح تقريباً t^{-2} وt^{-4}.

لذلك تنخفض الكثافتان مع تمدد الكون. لكن الكثافة ليست المجموع.

عندما تكامل الورقة على منطقة الزمكان المتمددة، يغير الحجم المتزايد النتيجة. ففي أمثلة هيمنة المادة وهيمنة الإشعاع المألوفة فيزيائياً، تزداد الإنتروبيا الكلية مع الزمن حتى بينما تنخفض الإنتروبيا لكل وحدة حجم. ولا تستمر الطاقة الكلية في النمو؛ ففي الرتبة الرائدة تقترب من ثابت.

هذه أكثر نتائج الورقة فائدة من الناحية المفاهيمية. الانخفاض المحلي في الإنتروبيا أو التخفيف لا يتعارض تلقائياً مع قانون ثان عالمي. يمكن لمنطقة أن تصبح أقل إنتروبيا محلياً لكل وحدة حجم بينما تزداد الإنتروبيا المكاملة لأن حجم الزمكان ينمو أسرع.

ولا يثبت الحساب أن هذا هو التفسير المجهري الصحيح لسهم الزمن الترموديناميكي في الكون الحقيقي. بل يبين أن الإطار المقترح يستطيع استيعاب الانقسام المحلي-الكلي من دون تناقض في تقريب Friedmann الخاص به.

مقارنة مع دي سيتر، بدرجة حرارة مختلفة

تنظر الورقة أيضاً في فضاء دي سيتر، وهو زمكان مثالي يتمدد أسياً مع H ثابت. وبالنسبة إلى مراقب واحد لا تكامل إلا على **ماسة سببية** منتهية: تقاطع مخروط الضوء المستقبلي لحدث سابق مع مخروط الضوء الماضي لحدث لاحق، وهو ما يحد منطقة الزمكان التي يمكن أن تشارك في الرصد بينهما. وعلى هذه الماسة تتناسب إنتروبيا GfE الكلية مع H^{-2}، أي اعتماد H نفسه لإنتروبيا Gibbons-Hawking المألوفة. وتكون طاقة GfE الكلية من رتبة الواحد بوحدات النموذج.

> **عائلة واحدة من الخلفيات الكونية**
>
> حالتان الإشعاع وهيمنة المادة هيمنة أكوان واحداً. إضافياً مكاناً وليست الخواص، ومتساوية المتجانسة الهندسات من عائلة FRW ثابت H مع الفراغ عليها يهيمن حالة يمثل لكنه ،FRW بصيغة سيتر دي فضاء كتابة أيضاً ويمكن النموذج. يملأ بما تتميزان FRW من الكون. من آخر نوعاً وليست واحد؛ لمراقب الزمكان ذلك داخل مختارة منتهية منطقة فهي السببية الماسة أما أسي. وتمدد

تطابق مقياس لا يساوي اشتقاق الجسم الفيزيائي نفسه. فدرجة حرارة k المرتبطة في GfE تتناسب مع H^2، بخلاف درجة حرارة دي سيتر القياسية التي تتناسب مع H. وتفسر الورقة هذا الاختلاف باعتباره إشارة إلى أن k-temperature تنتمي إلى هندسة الزمكان، لا إلى الحقول الكمومية التي تعيش على تلك الخلفية.

ثم تقترح أن درجة حرارة كهذه قد ترتبط بإشعاع الغرافيتونات بدلاً من انبعاث الجسيمات العادي. هذا سؤال للمستقبل، لا نتيجة للورقة. يجب أولاً تكميم النظرية لإثبات ما إذا كانت درجات حرارتها تقابل إشعاعاً أصلاً.

ما الذي لا تثبته هذه الدراسة؟

- إنها لا تُظهر رصدياً أن الجاذبية تنشأ من الإنتروبيا.
- إنها لا تثبت أن الحد الفعال في النموذج هو الطاقة المظلمة المقاسة في علم الكون.
- إنها لا تستبدل النسبية العامة بنظرية متفوقة مختبرة. تظهر النسبية العامة هنا كحد للمقترح عند الطاقة المنخفضة والانحناء الصغير.
- إنها لا تجعل كونيات Friedmann حلولاً دقيقة لـGfE. إنها التقريب المستخدم لتقدير السلوك الترموديناميكي للنموذج.

- إنها لا تشتق عدداً مجهرياً كاملاً لدرجات حرية الزمكان.
- إنها لا تقدم نظرية مكتملة للجاذبية الكمومية ولا تكشف غرافيتونات.
- إنها لا تُظهر أن درجات الحرارة k السالبة هي قراءات سالبة عادية لميزان حرارة.

ما مدى قوة النتيجة؟

هذه ورقة نظرية محكمة، لذلك تعني كلمة «دليل» هنا شيئاً مختلفاً عما تعنيه في تجربة. الأسئلة المناسبة هي: هل التعريفات متماسكة؟ هل الاشتقاقات تتبع منها؟ وهل التقريبات مذكورة ومضبوطة؟

على هذا المستوى، تقدم الورقة قاموساً ترموديناميكياً ملموساً لـGfE وتشتق بنية قانون أول بدلاً من الاعتماد على التشبيه وحده. كما تجعل حد التقريب ظاهراً بصورة غير معتادة: حلول Friedmann مستعارة من النسبية العامة، وتُدخل في كميات GfE، وتُقيد بنظام يبقى فيه المتري المستحث حسن السلوك.

أما الادعاءات الفيزيائية الأكبر فتبقى مفتوحة. الإطار حديث، والورقة لا تقارن كونيته بالبيانات، وبعض أكثر دلالاته إثارة — التكميم، وديناميكيات هندسة التماس، وإشعاع الغرافيتون المحتمل — مطروحة كاتجاهات لعمل مستقبلي. الاتساق الداخلي ضروري لأي نظرية جاذبية جديدة، لكنه غير كاف لإثبات أن الطبيعة تعمل بها.

لماذا يهم هذا؟

العلاقة بين الجاذبية والديناميكا الحرارية قديمة وعميقة، من إنتروبيا الثقوب السوداء إلى حرارة فضاء دي سيتر. وكثير من هذه النتائج منظم حول الآفاق. أما GfE فتحاول بناء مقياس معلومات محلي وحجمي مباشرة من العلاقة بين المادة والهندسة.

هل سيصمد هذا المقترح؟ سؤال مفتوح. لكن التمرين الترموديناميكي يكشف هدفاً مفيداً لأي نظرية من هذا النوع: ينبغي أن تشرح كيف يمكن للبنية المحلية وكثافة الإنتروبيا المحلية المتناقصة أن تتعايشا مع إنتروبيا كلية متزايدة في كون يتمدد.

تُظهر هذه الورقة طريقة رياضية صريحة واحدة لحدوث ذلك. وقيمتها ليست في إغلاق مسألة الجاذبية-الإنتروبيا، بل في تحويل جزء منها إلى معادلات يمكن ذكر افتراضاتها وحدودها واختباراتها التالية بوضوح.

الخلاصة الواضحة

تشتق Bianconi وصفاً ترموديناميكياً داخل From Gravity، Entropy وهو إطار مقترح للجاذبية المعدلة مبني على إنتروبيا نسبية كمومية هندسية. وتخضع متغيرات الإنتروبيا والطاقة والحرارة والضغط المحلية في النموذج لقانون أول. وعندما تُقيّم كميات GfE الكاملة على تقريبات Friedmann منخفضة الطاقة وصغيرة الانحناء، تنخفض كثافات الإنتروبيا والطاقة المحلية مع تمدد الكون، بينما ترتفع الإنتروبيا الكلية لأن حجم الزمكان ينمو؛ وتقترب الطاقة الكلية من ثابت في الرتبة الرائدة في أمثلة هيمنة المادة والإشعاع. وتعطي ماسة سببية في دي سيتر إنتروبيا تتناسب مع H^{-2}، لكن بدرجة حرارة نموذجية مختلفة عن حرارة الأفق القياسية. هذه نتائج رياضية شرطية داخل GfE، لا دليلاً رصدياً على أن الجاذبية تأتي من الإنتروبيا، ولا قياساً للطاقة المظلمة، ولا نظرية مكتملة للجاذبية الكمومية.

المصادر

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