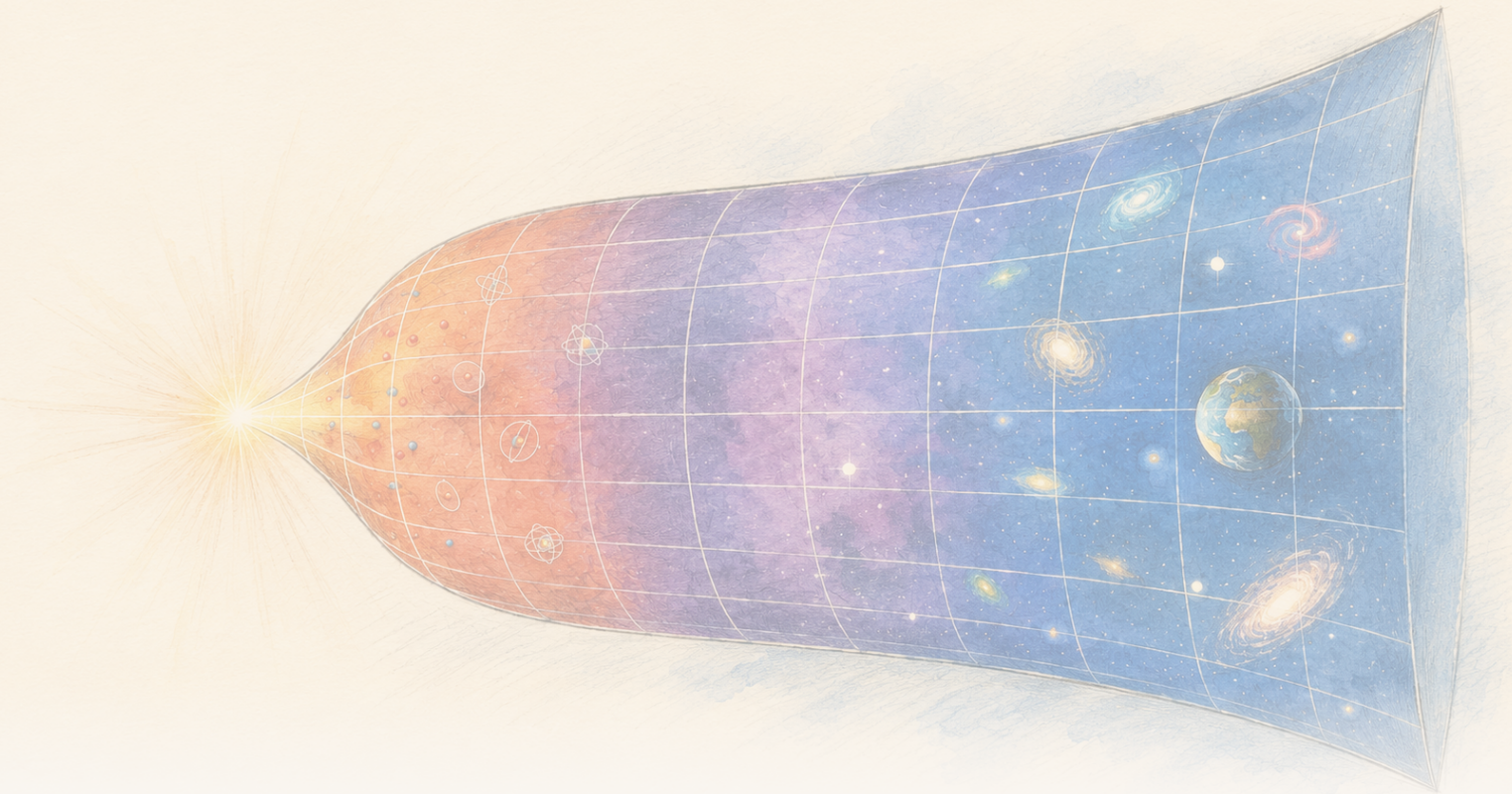




The CLEAN PAPER

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

בתוך מודל כבידה מבוסס-אנטרופיה, צפיפות האנטרופיה המקומית יורדת בעוד שהסך הכולל גדל

מאמר ב-*D Review Physical* גוזר טמפרטורות, לחצים וחוק ראשון בתוך *Entropy, From Gravity* מסגרת מוצעת של כבידה מתוקנת. בקירוב *Friedmann* מאוחר ובעל עקמומיות נמוכה, צפיפויות האנטרופיה והאנרגיה המקומיות של המודל יורדות, בעוד שההתפשטות גורמת לאנטרופיה הכוללת לעלות. החישוב קונקרטי מבחינה פנימית אך מותנה. קוסמולוגיות *Friedmann* אינן פתרונות מדויקים של התורה המלאה, וזו אינה ראייה תצפיתית לכך שכבידה נובעת מאנטרופיה, אינה הסבר לאנרגיה האפלה הנמדדת ואינה תורת כבידה קוונטית שלמה.

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

נפח שגדל יכול להוריד צפיפות ובו בזמן להעלות את הסך הכולל

אם צפיפות האנטרופיה במודל הזה יורדת כשהיקום מתפשט, איך ייתכן שהאנטרופיה הכוללת שלו עדיין גדלה? דמיינו יקום מתפשט המחולק לתאים זעירים. הכמות של דבר מסוים בכל תא יכולה לרדת גם כאשר הכמות הכוללת בכל האזור הגדל עולה. ירידה בצפיפות ועלייה בסך הכול אינן הפכים כאשר גם הנפח עצמו משתנה.

החישוב הפשוט הזה עומד בלבו של מאמר תאורטי שאפתני בהרבה. ב-D Review Physical, הפיזיקאית המתמטית Bianconi Ginestra מפתחת תיאור תרמודינמי של Entropy From Gravity (GfE), מודל מוצע חדש יחסית שבו הכבידה מקודדת באמצעות קשר מתורת המידע בין חומר לגאומטריה. כאן "מתורת המידע" פירושו שהמודל מתחיל מממד מתמטי של ההבדל בין שני תיאורים של גאומטריה: הגאומטריה הפיזית וגאומטריה הנגרמת על ידי חומר ועקמומיות.

המאמר גוזר גדלים מקומיים המכונים k-pressures, k-temperatures, k-energies, k-entropies. הקידומת k מפרידה בין מגזרים גאומטריים שונים במודל; אלה אינם חומרים שונים או תקופות קוסמיות שונות. הקשר ביניהם מקבל את המבנה המתמטי של החוק הראשון בתרמודינמיקה: שינוי באנרגיה קשור לטמפרטורה כפול שינוי באנטרופיה, פחות לחץ כפול שינוי בנפח.

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

לאחר מכן המאמר מעריך את הגדלים האלה באמצעות קוסמולוגיות Friedmann מתפשטות: יקומים אידאליים סטנדרטיים שהם הומוגניים ואיזוטרופיים בקני מידה גדולים. במשטר של אנרגיה נמוכה ועקמומיות קטנה, הדוגמאות הנשלטות על ידי חומר וקרינה מציגות צפיפויות אנטרופיה ואנרגיה מקומיות שזורות, אך ההתפשטות מספקת מספיק נפח כדי שהאנטרופיה הכוללת תעלה. האנרגיה הכוללת מתקרבת לקבוע בסדר המוביל, כלומר כאשר שומרים את האיבר הדומיננטי בזמנים גדולים ומשמיטים איברים שדועכים מהר יותר ככל שהזמן גדל.

זו תוצאה מתמטית ברורה. לא פחות חשוב להבין את גבולותיה: החישוב נעשה בתוך תורה מוצעת אחת, וקוסמולוגיות Friedmann המשמשות לדוגמאות הקונקרטיות הן רק קירובים, לא פתרונות מדויקים של משוואות GfE המלאות. משוואות התנועה האלה מתקבלות מווריאציה של פעולת GfE המוצעת וכוללות את שדה G הדינמי ואת המגזרים הגאומטריים מסדר גבוה שאינם קיימים במשוואות Friedmann הרגילות. המאמר אינו צופה באנטרופיה שיוצרת כבידה, אינו מזהה את האנרגיה האפלה ביקום שלנו ואינו משלים תורת כבידה קוונטית.

מה Entropy From Gravity מניח

היחסות הכללית מתארת כבידה באמצעות גאומטריית המרחב-זמן. חומר אומר למרחב-זמן כיצד להתעקם, והעקמומיות אומרת לחומר כיצד לנוע. GfE מתחיל מפעולה מוצעת אחרת: הוא מתייחס לאובייקטים הקשורים למטריקה כאל אופרטורים קוונטיים ובונה את הלגרנז'יאן שלו מתוך אנטרופיה יחסית קוונטית גאומטרית (GQRE Entropy, Relative Quantum (Geometric).

שלושה מונחים ב-120 שניות

שאפשר מניח GfE טרנספורמציה. או גודל ומייצג קוונטי מצב על שפועל מתמטי כלל הוא קוונטי אופרטור הזו. הבנייה את לשחזר מהקורא דורש אינו המאמר שלו; למטריקה הקשורים לאובייקטים כך להתייחס לגרנז'יאן הוא מתכון מתמטי קומפקטי לדינמיקה של תורה. מבצעים עליו אינטגרציה על פני מרחב-זמן כדי לקבל פעולה, ואז מבצעים וריאציה של הפעולה כדי לגזור את משוואות השדה. GQRE הוא הלגרנז'יאן הספציפי למודל שנבחר ב-GfE. הוא מתאים את רעיון האנטרופיה היחסית הקוונטית להשוואה בין המטריקה הפיזית לבין מטריקה מסדר גבוה הנגרמת על ידי חומר ועקמומיות. העובדה שקוראים לו אנטרופיה אינה הופכת אותו לאנטרופיית חום רגילה.

אנטרופיה יחסית היא בדרך כלל מדד ליכולת להבחין בין שתי התפלגויות הסתברות או שני מצבים קוונטיים. ב-GfE ההשוואה היא בין המטריקה הפיזית לבין מטריקה מסדר גבוה הנגרמת על ידי חומר ועקמומיות. "מסדר גבוה" אינו אומר ממדים נוספים של מרחב-זמן. פירושו שהמודל אורז מגזרים גאומטריים סקלריים, דמויי-וקטור ודמויי-ביווקטור בתוך אובייקט מורחב אחד. שדה G דינמי מקשר בין הרכיבים האלה ו"מלביש" את המטריקה המשמשת הן בחלק הכבידתי והן בחלק החומרי של המודל. המסגרת בנויה כך שבגבול של אנרגיה נמוכה ועקמומיות קטנה הפעולה שלה מצטמצמת לפעולת Einstein-Hilbert של היחסות הכללית בתוספת פעולת החומר.

קל לקרוא יותר מדי לתוך המשפט האחרון. שחזור משוואות איינשטיין בגבול מסוים הוא יעד עקביות של ההצעה. הוא אינו מראה שהטבע משתמש בתורה הגדולה יותר מחוץ לגבול הזה.

משוואות השדה של GfE מכילות גם איבר דינמי שהמסגרת מכנה איבר אפקטיבי מתהווה של אנרגיה אפלה. במאמר הזה Bianconi מזהה את צפיפות האנרגיה הפנימית של המודל עם האיבר הזה. "אנרגיה אפלה אפקטיבית" מתארת את תפקידה במשוואות. זה אינו זיהוי אמפירי עם האנרגיה האפלה שמוסקת מתצפיות קוסמולוגיות.

שלושה שימושים שונים במילה "אנטרופיה"

מאקרוסקופי. מצב ליצור יכולים מיקרוסקופיים סידורים כמה סופרת רגילה תרמודינמית אנטרופיה היא הזה במאמר GQRE קוונטיים. מצבים שני בין להבחין אפשר כמה עד מודדת קוונטית יחסית אנטרופיה דומים שמות הכבידתי. כלגרנז'יאן המשמשת יחסית, אנטרופיה בהשראת למודל, ספציפית גאומטרית בנייה GfE. בתוך משתמש הוא שבהם הקשרים את גוזר המאמר לבני-החלפה; האלה הגדלים את הופכים אינם

התוצאה התרמודינמית המדויקת בתוך המודל

המאמר עובד תחילה ברמת מסגרת GfE עצמה. עבור כל סדר וסוג של דרגת חופש גאומטרית, המסומנים ב- k , הוא מגדיר:

- k -entropy מקומית מתוך GQRE;
- k -energy מקומית מתוך צפיפות האנרגיה הפנימית של המודל;
- k -temperature צמודה;
- k -pressure-1.

הגדלים האלה מצייתים לחוק ראשון מקומי. בסימון של המאמר,

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

האינדקס k אינו רשימה של חומרים שונים או תקופות שונות ביקום. בחישוב ההומוגני והאיזוטרופי הוא מסמן חמישה רכיבים: רכיב סקלרי אחד; רכיבים נפרדים דמויי-זמן ודמויי-מרחב מן המגזר דמוי-הווקטור; ורכיבים נפרדים זמן-מרחב ומרחב-מרחב מן המגזר דמוי-הביווקטור. לסקלר אין אינדקס כיווני, הרכיבים דמויי-הווקטור מבדילים בין כיוון זמני לכיוונים מרחביים, וביווקטור בנוי מזוגות כיוונים. לכל מגזר יכולה להיות טמפרטורה ולחץ משלו. k -temperature יכולה גם להיות חיובית או שלילית, בהתאם לרכיב המתאים של שדה G .

אלה אינן טמפרטורות שנמדדות באמצעות מדחום ליד אופק קוסמולוגי. הטמפרטורה הסטנדרטית של שדות קוונטיים ב-Sitter de-פרופורציונלית ל- H : טמפרטורת Gibbons-Hawking משויכת לאופק הקוסמולוגי, בעוד ואקום-Bunch-Davies הוא המצב הקוונטי הסטנדרטי שאינו משתנה תחת סימטריות Sitter de ושמתאמי השדה שלו נותנים את התגובה התרמית הקשורה. המאמר מבדיל במפורש בין שניהם לבין ה- k -temperatures הגאומטריות שלו, שבדוגמת Sitter de פרופורציונליות ל- H^2 . כאן "טמפרטורה" היא משתנה תרמודינמי צמוד הנגזר מהגדרות האנטרופיה והאנרגיה של המודל.

לכן זהות החוק הראשון היא גזירה אמיתית, אבל היא תוצאה המותנית בהנחות המודל: אם מקבלים את פעולת GfE ואת ההגדרות שלה, המבנה התרמודינמי הזה נובע מהן.

למה חישוב Friedmann הוא קירוב

כדי להפוך את הפורמליזם לדוגמה קוסמולוגית, המאמר משתמש במרחבי-זמן Friedmann-Robertson-Walker (FRW) הומוגניים ואיזוטרופיים. "הומוגני" פירושו שלמודל בקנה מידה גדול יש אותן תכונות ממוצעות בכל מקום; "איזוטרופי" פירושו שהוא נראה אותו דבר בכל כיוון. פקטור סקלה יחיד מתאר כיצד מרחקים גדלים עם הזמן, החומר מיוצג כנוזל מושלם וחלק, ופרמטר Hubble H מסכם את קצב ההתפשטות. זהו רקע אידאלי, לא מפה של גלקסיות בודדות.

אבל יש אי-התאמה מבנית. יקומי Friedmann פותרים את משוואות איינשטיין. באופן כללי הם אינם פותרים את משוואות GfE המלאות מסדר גבוה, שעוקבות גם אחר המגזרים הסקלרי, דמוי-הווקטור ודמוי-הביווקטור ואחר נגזרות של שדה G . משוואות איינשטיין מופיעות מחדש רק בגבול מסדר ראשון, אנרגיה נמוכה ועקמומיות קטנה של ההצעה.

המאמר אומר זאת ישירות ומתייחס לפתרונות Friedmann כאל קירובים, בגישה המשווה להכנסת פתרון שדה-ממוצע לתורה מלאה יותר כדי לבדוק היכן הקירוב נשאר אמין. המשטר דורש אנרגיה נמוכה ועקמומיות קטנה, המסוכמות בתנאי $l_p H \ll 1$, כאשר l_p הוא אורך פלאנק. תנאי שני דורש שהמכפלה של המטריקה המושרית מסדר גבוה והמטריקה הפיזית ההפוכה מסדר גבוה תישאר חיובית-מוגדרת.

לכן התוצאה אינה GfE "חוצה את ההיסטוריה של היקום שלנו". הניסוח המדויק יותר הוא: אם יקום GfE מקורב מספיק היטב על ידי קוסמולוגיית Friedmann מוכרת, אלה הסקלות התרמודינמיות שמתקבלות מן הגדלים המלאים של GfE.

התוצאה המקומית מול הכוללת

בתוך המשטר הזה, הגדלים המקומיים המובילים מציגים סקלות פשוטות:

- צפיפות האנטרופיה במודל פרופורציונלית ל- H^2 ;
- צפיפות האנרגיה במודל פרופורציונלית ל- H^4 ;
- ובדוגמאות Friedmann שאינן Sitter de בזמנים מאוחרים, הן הופכות בקירוב ל- t^{-2} ול- t^{-4} .

לכן שתי הצפיפויות יורדות עם התפשטות היקום. אבל צפיפות אינה הסך הכולל.

כאשר המאמר מבצע אינטגרציה על פני אזור המרחב-זמן המתפשט, הנפח הגדל משנה את התשובה. בדוגמאות המוכרות פיזיקלית הנשלטות על ידי חומר וקרינה, האנטרופיה הכוללת עולה עם הזמן אף שהאנטרופיה ליחידת נפח יורדת. האנרגיה הכוללת אינה ממשכה לגדול; בסדר המוביל היא מתקרבת לקבוע.

זו התוצאה המושגית השימושית ביותר במאמר. סדר מקומי או דילול מקומי אינם מתנגשים אוטומטית עם חוק שני גלובלי. אזור יכול להפוך לפחות אנטרופי ליחידת נפח בזמן שהאנטרופיה המשולבת גדלה, מפני שנפח המרחב-זמן גדל מהר יותר.

החישוב אינו מוכיח שזהו ההסבר המיקרוסקופי הנכון לחץ הזמן התרמודינמי ביקום האמיתי. הוא מראה שהמסגרת המוצעת יכולה להכיל את הפיצול מקומי-גלובלי ללא סתירה בקירוב Friedmann שלה.

השוואה ל-Sitter, de עם טמפרטורה אחרת

המאמר בוחן גם מרחב Sitter, de מרחב-זמן אידאלי המתפשט מעריכית עם H קבוע. עבור צופה יחיד הוא מבצע אינטגרציה רק על פני **יהלום סיבתי** סופי: החפיפה בין חרוט האור העתידי של אירוע מוקדם לבין חרוט האור העברי של אירוע מאוחר, שמגבילה את אזור המרחב-זמן שיכול להשתתף בתצפיות ביניהם. על פני היהלום הזה, האנטרופיה הכוללת של GfE פרופורציונלית ל- H^{-2} , אותה תלות ב- H כמו אנטרופיית Gibbons-Hawking המוכרת. האנרגיה הכוללת של GfE היא מסדר אחד ביחידות המודל.

משפחה אחת של רקעים קוסמולוגיים

ידי על הנשלטים יקומים אחד. נוסף מקום לא ואיזטרופיות, הומוגניות גאומטריות של משפחה היא FRW בצורה לכתיבה ניתן de Sitter מרחב גם המודל. את שממלא במה הנבדלים FRW של מקרים הם וקרינה חומר הסיבתי היהלום מעריכית. והתפשטות קבוע H עם ואקום ידי על הנשלט מקרה מייצג הוא אבל, FRW של יקום. של אחר סוג אינו הוא אחד; צופה עבור מרחב-זמן אותו בתוך שנבחר סופי אזור הוא

התאמה בסקלה אינה זהה לגזירה של אותו עצם פיזיקלי. ה-k-temperature המתאימה של GfE פרופורציונלית ל- H^2 , בניגוד לטמפרטורת Sitter de הסטנדרטית, הפרופורציונלית ל- H . המאמר מפרש את ההבדל הזה כראיה לכך ש-k-temperature שייכת לגאומטריית המרחב-זמן ולא לשדות קוונטיים החיים על הרקע הזה.

לאחר מכן הוא מציע שטמפרטורה כזו אולי קשורה לקרינת גרביטונים ולא לפליטת חלקיקים רגילים. זו שאלה לעתיד, לא תוצאה של המאמר. תחילה יהיה צורך לכמת את התורה כדי לקבוע אם הטמפרטורות שלה קשורות בכלל לקרינה.

מה זה לא מוכיח

- זה לא מראה תצפיתית שכוח הכבידה נובע מאנטרופיה.

- זה לא קובע שהאיבר האפקטיבי של המודל הוא האנרגיה האפלה הנמדדת בקוסמולוגיה.
- זה לא מחליף את היחסות הכללית בתורה טובה יותר שנבדקה. היחסות הכללית מופיעה כאן כגבול של אנרגיה נמוכה ועקמומיות קטנה של ההצעה.
- זה לא הופך קוסמולוגיות Friedmann לפתרונות מדויקים של GfE. הן הקירוב המשמש להערכת ההתנהגות התרמודינמית של המודל.
- זה לא גוזר ספירה מיקרוסקופית מלאה של דרגות החופש של מרחב-זמן.
- זה לא מספק תורת כבידה קוונטית שלמה ואינו מזהה גרביטונים.
- זה לא מראה ש-k-temperatures שליליות הן קריאות שליליות רגילות במדחום.

עד כמה התוצאה חזקה?

זהו מאמר תאורטי שעבר ביקורת עמיתים, ולכן "ראיות" פירושן כאן משהו שונה מניסוי. השאלות המתאימות הן האם ההגדרות קוהרנטיות, האם הגזירות תקפות והאם הקירובים מוצגים ונשלטים בצורה ברורה.

ברמה הזו המאמר מספק מילון תרמודינמי קונקרטי עבור GfE וגוזר מבנה של חוק ראשון במקום להסתמך על אנלוגיה בלבד. הוא גם הופך את גבול הקירוב לגלוי באופן יוצא דופן: פתרונות Friedmann מושאלים מן היחסות הכללית, מוכנסים לגדלים של GfE ומוגבלים למשטר שבו המטריקה המושרית נשארת מתנהגת היטב.

הטענות הפיזיקליות הגדולות יותר נשארות פתוחות. המסגרת חדשה, המאמר הזה אינו משווה את הקוסמולוגיה שלה לנתונים, וכמה מן ההשלכות המעניינות ביותר — כימות, דינמיקה בגאומטריית מגע וקרינת גרביטונים אפשרית — מוצגות ככיוונים למחקר עתידי. עקביות פנימית היא תנאי הכרחי לתורת כבידה חדשה. היא אינה מספיקה כדי להראות שהתורה מתארת את הטבע.

למה זה חשוב

הקשר בין כבידה לתרמודינמיקה עתיק ועמוק, מאנטרופיית חורים שחורים ועד טמפרטורת Sitter. de רבות מן התוצאות האלה מאורגנות סביב אופקים. GfE מנסה במקום זאת לבנות מדד מידע מקומי ונפחי ישירות מן הקשר בין חומר לגאומטריה.

השאלה אם ההצעה הזו תשרוד פתוחה. אבל התרגיל התרמודינמי חושף יעד שימושי לכל תורה כזו: עליה להסביר כיצד מבנה מקומי וצפיפות אנטרופיה מקומית שיורדת יכולים להתקיים יחד עם אנטרופיה כוללת שעולה ביקום מתפשט.

המאמר הזה מציג דרך אחת מפורשת מתמטית שבה זה יכול לקרות. הערך שלו אינו בכך שהוא סוגר את בעיית הכבידה-אנטרופיה. הוא הופך חלק ממנה למשוואות שאפשר לציין בבירור את ההנחות, הגבולות והבדיקות הבאות שלהן.

בקצרה

Bianconi גוזרת תיאור תרמודינמי בתוך Entropy, From Gravity מסגרת מוצעת של כבידה מתוקנת המבוססת על אנטרופיה יחסית קוונטית גאומטרית (GQRE). משתני האנטרופיה, האנרגיה, הטמפרטורה והלחץ המקומיים של המודל מצייתים לחוק ראשון. כאשר מעריכים את הגדלים המלאים של GfE על קירובי Friedmann באנרגיה נמוכה ובעקמומיות קטנה, צפיפויות האנטרופיה והאנרגיה המקומיות יורדות ככל שהיקום מתפשט, בעוד שהאנטרופיה הכוללת עולה משום שנפח המרחב-זמן גדל; בדוגמאות הנשלטות על ידי חומר וקרינה האנרגיה הכוללת מתקרבת לקבוע בסדר המוביל. יהלום סיבתי ב-Sitter de- נותן אנטרופיה הפרופורציונלית ל- H^{-2} , אך טמפרטורת מודל השונה מטמפרטורת האופק הסטנדרטית. אלה תוצאות מתמטיות מותנות בתוך GfE, לא ראייה תצפיתית לכך שכבידה נובעת מאנטרופיה, לא מדידה של אנרגיה אפלה ולא תורת כבידה קוונטית שלמה.

מקורות

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