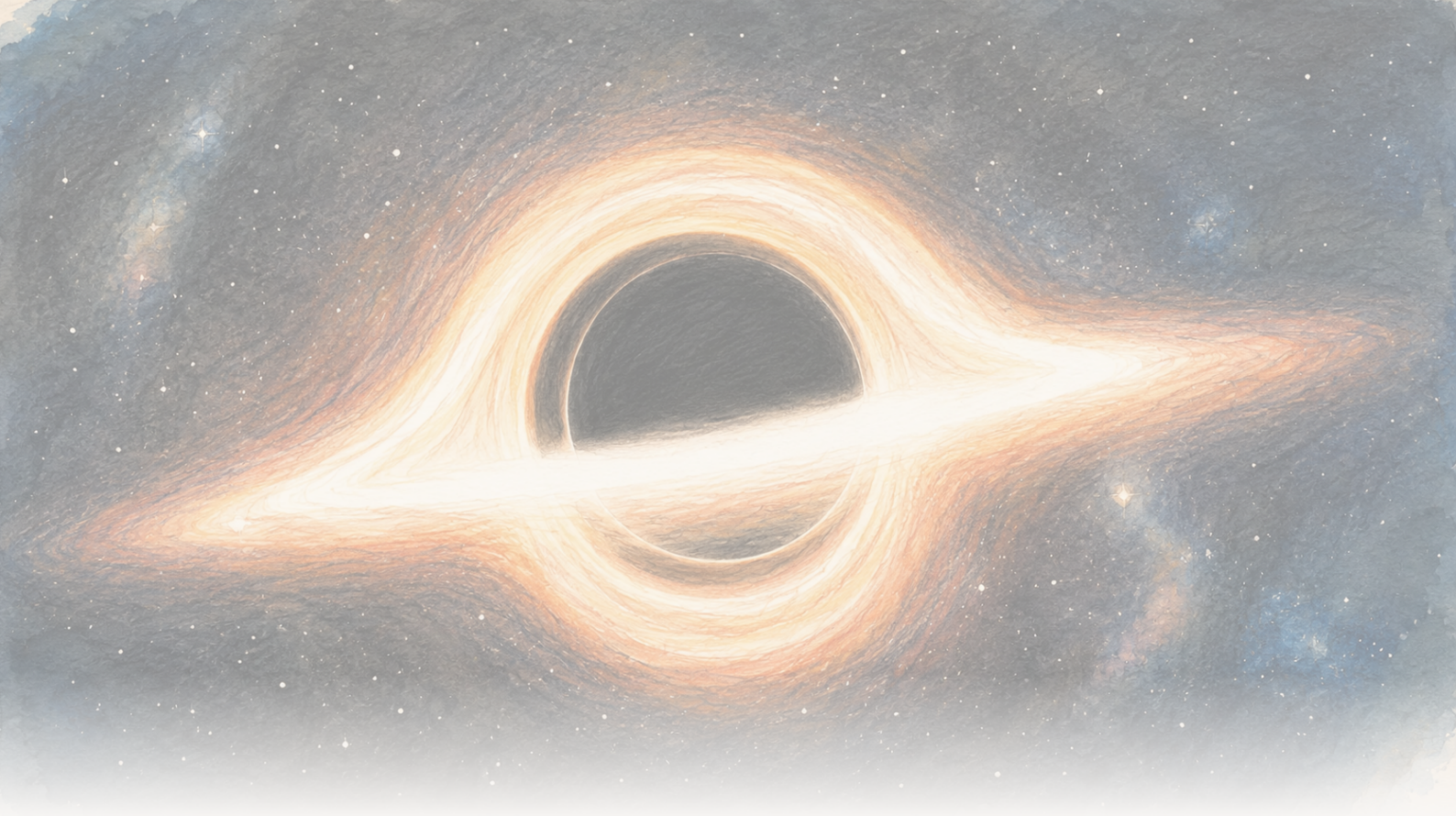




The CLEAN PAPER

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

חורים שחורים מצייתים ל'חוקים' תרמודינמיים — תוצאה חדשה מרחיבה אותם גם לחורים שחורים הרחק משיווי משקל

מאז שנות ה-1970 ידוע שחורים שחורים מצייתים לחוקים המקבילים לחוקי התרמודינמיקה, אבל הגרסה הנקייה ביותר חלה רק על חורים שחורים שקטים בשיווי משקל. מאמר חדש ב-*Letters Review Physical* מרחיב את החוק הראשון והשני לחורים שחורים שמשתנים במהירות — בולעים חומר, מתמזגים ופולטים קרינה — באמצעות 'אופקים דינמיים' המוגדרים מקומית. כך אפשר לייחס טמפרטורה ואנטרופיה גם לחור שחור המשתנה באלמות. זו תוצאה מתמטית ביחסות כללית קלאסית, לא כבידה קוונטית חדשה, לא תצפית ולא פתרון לפרדוקס המידע של החורים השחורים.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted,
human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium*, Abhay Ashtekar, Daniel E. Paraizo, Jonathan Shu, *Physical Review Letters*, 136 251405 (2026) · DOI: 10.1103/3c1r-v8f1

לחורים שחורים יש "חוקים" שנראים כמו תרמודינמיקה. הגרסה המסודרת עבדה רק כששום דבר לא קרה.

אחת העובדות המוזרות ביותר בפיזיקה היא שחורים שחורים מתנהגים כמו גופים חמים. בתחילת שנות ה-1970 הבחינו Hawking ו-Bekenstein שהמשוואות השולטות בחורים שחורים מתיישבות, איבר מול איבר, עם חוקי התרמודינמיקה: לחור שחור יש אנטרופיה הפרופורציונלית לשטח האופק שלו, וטמפרטורה הפרופורציונלית לכבידת פני השטח שלו. לאחר מכן Hawking הראה שהטמפרטורה אמיתית במובן העמוק ביותר — חור שחור באמת זוהר, חלש מאוד, בקרינה תרמית.

מהי קרינת הוקינג?

טמפרטורה וללא לחלוטין שחור להיות צריך הוא לכאורה ולכן שחור, מחור בורח אינו דבר שום קלאסי באופן ליד הקוונטים תורת את בחשבון מביאים כאשר משתנה שהמצב הראה Stephen Hawking ב-1974 בכלל. תרמי הספקטרום "מתאדה". כלומר באיטיות, מסה מאבד ולכן חלש תרמי זוהר פולט שחור חור האופק; בתמונה לאינסוף. שמגיעה הקרינה את משנה עקום מרחב-זמן דרך שהתפשטות בעוד הוקינג, בטמפרטורת יצירות לאופק מחוץ ממש קוונטיות תנודות — Hawking של המקורית הגזירה שאינה — נפוצה היוריסטית פנימה. נופל והשני כקרינה בורח אחד זוג בן שבהם זוגות התכונה המרכזית היא שהטמפרטורה הזו הפוכה למסת החור השחור: ככל שהחור קטן יותר, הוא חם יותר. עבור כל חור שחור שטלסקופ יכול לראות, הטמפרטורה נמוכה באופן בלתי נתפס — הרבה יותר קרה מן החלל הריק שסביבו — ולכן בפועל הזוהר זניח לחלוטין ומעולם לא נמדד ישירות. החשיבות שלו מושגית: קרינת הוקינג היא מה שהופך את האבולוציה בין מכניקת חורים שחורים לתרמודינמיקה לדבר אמיתי. מפני שלחור יש באמת טמפרטורה, ה"טמפרטורה" וה"אנטרופיה" בחוקים האלה הן גדלים תרמודינמיים אמיתיים ולא צירוף מקרים פורמלי. (זהו רקע למאמר הנוכחי, לא אחת מתוצאותיו.)

ההתאמה הזו מעוגנת בתוצאה המכונה החוק הראשון של מכניקת חורים שחורים, Hawking-Carter (Bardeen, 1973). במילים, הוא אומר: אם מזיזים חור שחור מעט ממצב יציב אחד למצב יציב קרוב, השינוי במסה שלו שווה לטמפרטורה שלו כפול השינוי באנטרופיה, בתוספת איבר עבור הסיבוב. זו גרסת החור השחור של "חום שנכנס שווה לטמפרטורה כפול שינוי באנטרופיה".

יש מלכוד שמסתתר בביטוי מצב יציב קרוב. החוק הנקי מ-1973 משווה בין שני חורים שחורים שיושבים בשקט בשיווי משקל ושונים זה מזה רק באופן אינפיניטסימלי. הוא למעשה אינו מתאר תהליך — חור שחור הבולע כוכב, שני חורים שחורים שמתמזגים, או חור שזה עתה נולד ומצלצל לאחר לידה אלימה. אלה בדיוק המצבים שאנו רוצים ביותר להבין, והם ההפך מ"לשבת בשקט". החוק המסודר משתתק בדיוק כשהחור השחור נעשה מעניין.

למה התיקון המתבקש אינו עובד

אפשר לחשוב שהתיקון פשוט: רק לעקוב אחר האופק כשהוא גדל עם נפילת חומר פנימה. הבעיה היא איזה אופק.

האופק שרוב האנשים מדמיינים — אופק האירועים, נקודת האלי-חזור האמיתית — מחזיק תכונה עדינה ומביכה: הוא מוגדר על ידי כל עתידו של היקום. כדי לדעת היכן אופק האירועים נמצא עכשיו, צריך לדעת את כל מה שייפול אי פעם אל החור, לנצח. זו אינה דקדקנות טכנית. אופק אירועים יכול להתחיל לגדול באזור חלל ריק ושטוח לחלוטין לפני שהחומר שיזין אותו בכלל הגיע, רק משום שהחומר עתיד להגיע מאוחר יותר. השטח שלו יכול לגדול במקום

שבו, מקומית, לא קורה דבר.

איך אופק יכול לגדול לפני שהחומר מגיע?

כאן שלו. הגלובלית ההגדרה או, האירועים אופק של הטלאולוגי האופי הוא הזו לחידה המדעי השם פירוש בזמן. לאחר השפעה שולח שהוא או העתיד את חוזה שהוא מטרה, יש שלאופק אומר אינו "טלאולוגי" המלאה העתידית ההיסטוריה מתוך רק להכרעה ניתנת האופק בתוך נמצא אירוע אם שהשאלה הוא הדבר המרחב-זמן. של

ההגדרה הפורמלית אומרת אותו דבר בתמצית. דמיינו את האינוסוף האפסי העתידי — $infty, null future$ המסומן ^+I — כיעד שאליו מגיע אור שבורח לנצח אל עתיד ריק ואינוסופי. אופק האירועים הוא הגבול בין אירועים שמהם אור היוצא החוצה יכול בסופו של דבר להגיע ליעד הזה לבין אירועים שמהם שום אור לא יוכל להגיע אליו לעולם. בסימון הסטנדרטי של היחסות הכללית, הוא הגבול של העבר הסיבתי של האינוסוף האפסי העתידי: $J^-(^+I)$. מכיוון שהמילה לעולם בנויה לתוך ההגדרה, שום מדידה שנעשית רק כאן ועכשיו אינה יכולה למקם בדיוק את אופק האירועים.

קליפה כדורית קורסת הופכת את המוזרות לגלויה. לפני שהקליפה מגיעה, האזור שבתוכה יכול להיות ריק ושטוח מקומית. שולחים קרני אור החוצה מן המרכז בזמנים מאוחרים יותר ויותר: הקרניים המוקדמות בורחות, ואילו המאוחרות פוגשות את הקליפה הקורסת בגאומטריה שממנה אינן יכולות לצאת. אופק האירועים הוא הגבול המפריד בין שני הגורלות האלה. כאשר עוקבים אחר הגבול לאחור, הוא מתחיל במרכז ומתפשט דרך הפנים שעדיין ריק ושטוח לפני שהקליפה מגיעה אליו. הגדילה בשטח אינה מדווחת על זרימה מקומית של חומר שם; היא מתעדת אילו נתיבי מילוט נשארים פתוחים במרחב-זמן המלא.

שום דבר בתמונה הזו אינו פועל לאחור בזמן. אילו הקליפה הייתה מוסטת ולא היה נוצר חור שחור, המרחב-זמן המלא היה שונה והאזור המוקדם הזה לא היה חלק מאופק אירועים. הלקח אינו שהעתיד משנה את העבר, אלא שאופק אירועים הוא גבול סיבתי גלובלי, לא משטח שצופה סמוך יכול לזהות ברגע אחד. זו בדיוק הסיבה שפיזיקאים משתמשים באופקים quasi-local או דינמיים כאשר הם רוצים לעקוב אחר חור שחור בזמן שהוא משתנה.

הדבר הופך את אופק האירועים לחסר תועלת כתיאור שוטף של "מצב" החור השחור. אפילו בסימולציית מחשב אי אפשר למקם אותו עד שהסימולציה הסתיימה, ובוודאי אי אפשר להשתמש בו כדי לעקוב רגע אחר רגע אחר טמפרטורה או אנטרופיה.

המהלך: אופק שאפשר להגדיר מקומית

המאמר החדש, מאת Shu, Jonathan-i Paraizo Daniel Ashtekar, Abhay, בונה את התוצאה שלו על מושג אחר של אופק — מושג quasi-local, שמוגדר רק מתוך הגאומטריה בסביבתו ואינו מתייחס לעתיד האינוסופי. "מקטעי אופק דינמי" כאלה הם בדיוק המשטחים שמומחי יחסות נומרית כבר משתמשים בהם כדי למצוא חורים שחורים בסימולציות מיזוג, מפני שהם מקומיים וישירים: השטח שלהם גדל רק במקום שבו אנרגיה באמת חוצה אותם.

מעל לכך המחברים פותרים את המחצית הקשה יותר של הבעיה. בתרמודינמיקה רגילה, מערכת הרחק משיווי משקל חמקמקה מאוד: אי אפשר לייחס לה באופן נקי טמפרטורה או לחץ יחידים, כי הגדלים האלה מוגדרים היטב רק לאחר שהמערכת נרגעת. לחורים שחורים יש אותה בעיה — עד, כך מראים המחברים, שמנצלים תכונה מיוחדת של היחסות הכללית. חור שחור בשייו משקל — חור שחור Kerr — נקבע על ידי שני מספרים בלבד: הגודל שלו והספין שלו. לכן המחברים בונים מיפוי שלוקח כל אופק משתנה בפראות והרחק משיווי משקל וקורא בכל רגע את שני המספרים של חור השחור בשייו משקל שהוא דומה לו באותו רגע. דרך המיפוי הזה אפשר בכל זאת לייחס לחור שחור משתנה

באלימות טמפרטורה וספין תלויי-זמן.

עם המרכיבים האלה — אנרגיה המוגדרת מקומית וזורמת דרך האופק, וגדלים אינטנסיביים רגועים — הם מרחיבים את החוק הראשון לחורים שחורים המרוחקים כרצוננו משיווי משקל. חשוב במיוחד, החוק החדש מתאר שינויים סופיים הנגרמים מתהליכים פיזיקליים אמיתיים (חומר וגלי כבידה החוצים את האופק), ולא צעדים אינפיניטסימליים בין שני מצבים קפואים. הם מצרפים לכך חוק שני תואם שהניסוח שלו כעת כמותי: שטח האופק גדל בכמות הקשורה ישירות לאנרגיה שזרמה פנימה. יחד, החוק הראשון והשני מצביעים על מסקנה נקייה אחת — אפילו באמצע האירוע האלים ביותר שאפשר לדמיין, המידה הנכונה לאנטרופיה של חור שחור נשארת שטח האופק שלו.

מה זה לא מוכיח

- זה לא פותר כבידה קוונטית. זו תוצאה בתוך יחסות כללית קלאסית, תוך שימוש בזיהוי הסטנדרטי של שטח האופק עם אנטרופיה. היא אינה גוזרת את האנטרופיה ממשהו יסודי יותר.
- זה לא סופר מיקרו-מצבים ואינו מסביר ממה עשויה האנטרופיה של חור שחור. הוא מרחיב את הנהלת החשבונות של התרמודינמיקה של חורים שחורים; הוא אינו פותח את הקופסה וחושף את דרגות החופש המיקרוסקופיות.
- זה לא פותר את פרדוקס המידע של חורים שחורים. החידה הזו חיה בתורת הקוונטים; המאמר הזה אינו נוגע בה.
- זו לא תצפית או מדידה. אין טלסקופ, אין נתונים ואין אות של גלי כבידה — זו מתמטיקה. ה"טמפרטורה" של חור שחור מתמזג כאן היא גודל המוגדר במדויק במשוואות, לא דבר שאפשר לקרוא במדחום.
- זה לא הופך את Hawking-1 Bekenstein. הוא מרחיב את התמונה שלהם למשטר הדינמי שבו החוק המקורי, שהוגבל לשיווי משקל, לא אמר דבר.

עד כמה הראיות חזקות?

חזקות, עבור מה שהעבודה היא: פיזיקה מתמטית זהירה ועקבית פנימית מקבוצה מובילה בתחום, שפורסמה כ-*Suggestion Editors' Letters Review Physical* (מאמר נלווה מפרט את הגזירות הארוכות יותר).

הסייגים הכנים נוגעים לסוג התוצאה, לא לאיכותה:

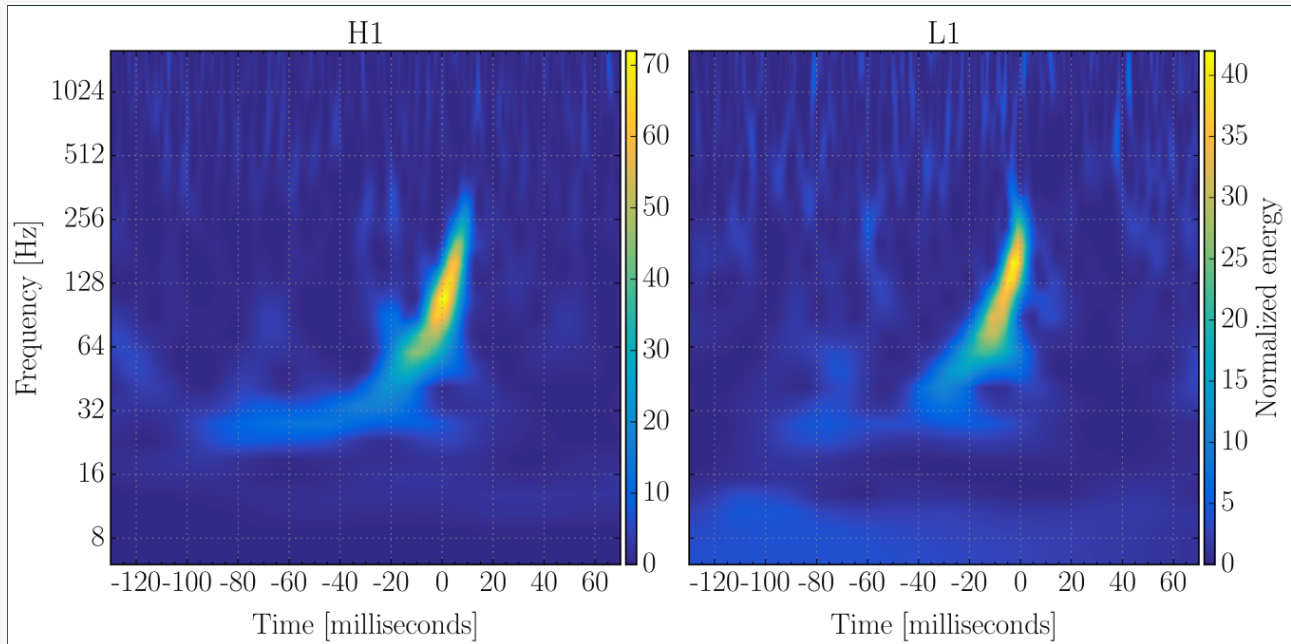
- היא נשענת על ההנחה המקובלת ששטח האופק הוא אנטרופיה (שטח חלקי ארבעה כפול קבוע ניוטון וקבוע פלאנק). אם תורת כבידה קוונטית מלאה תשנה אי פעם את הזיהוי הזה, גם הפרשנות תשתנה איתו.
- החישובים המרכזיים מפותחים עבור המקרה הנפוץ ביותר (אופקים דינמיים דמויי-מרחב ובעלי סימטריה צירית); המחברים טוענים שההגבלות אינן מהותיות, אך האמירה הכללית לחלוטין נשענת גם על תוצאות במאמרים אחרים.
- "אנטרופיה שווה שטח אופק, גם מחוץ לשיווי משקל" הוא זיהוי משכנע שהחוקים החדשים הופכים לטבעי — לא משפט שנגזר מסטטיסטיקה מיקרוסקופית.

לכן: הרחבה קשיחה של מסגרת בת חמישים שנה, לא גילוי ניסויי ולא חוק פיזיקלי חדש שממתין לבדיקה.

למה זה חשוב

יש שתי סיבות, אחת מעשית ואחת מושגית.

מעשית, החורים השחורים שאנו באמת חוקרים כיום — אלה ש-LIGO ו-Virgo שומעים מתמזגים — מבלים את הרגעים החשובים ביותר שלהם הרחק משיווי משקל. הגדלים במאמר הזה נבנים מאותם אופקים המוגדרים מקומית שסימולציות כבר עוקבות אחריהם, ולכן העבודה נותנת דרך עקרונית לדבר על אנטרופיה וטמפרטורה של חור שחור במהלך מיזוג או קריסה, לא רק לפני ואחרי.



GW150914, אות גלי הכבידה הראשון שזוהה ישירות, הגיע ממיזוג של שני חורים שחורים. מפות זמן-תדר אלה מציגות את האות ב-Hanford LIGO (משמאל) וב-Livingston LIGO (מימין): בשני הגלאים העקבה הבהירה מטפסת כלפי מעלה כאשר תדירות האות עולה לקראת המיזוג. זו דוגמה אמיתית למערכת חורים שחורים הרחק משיווי משקל; היא הקשר למסגרת התרמודינמית החדשה, לא ראייה תצפיתית לה.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 3.0

מושגית, ההתנהגות התרמודינמית של חורים שחורים היא אחד הרמזים הקונקרטיים המעטים שיש לנו לכבידה קוונטית — זה המקום שבו כבידה, תורת הקוונטים ותרמודינמיקה נפגשות באופן גלוי. חידוד המשמעות המדויקת של "אנטרופיה" ו"טמפרטורה" עבור חור שחור שמשתנה באלימות מחדד את המטרה שכל תורת כבידה קוונטית עתידית תצטרך לפגוע בה. העבודה אינה עונה על השאלה העמוקה של מהי באמת האנטרופיה של חור שחור. היא מנסחת את השאלה ביתר דיוק — ובפינה הזו של הפיזיקה, זה חלק גדול מן העבודה.

בקצרה

חורים שחורים מצייתים לחוקים המקבילים לתרמודינמיקה, אבל "החוק הראשון" הנקי מ-1973 השווה רק חורים שחורים שקטים בשיווי משקל ולא יכול היה לתאר תהליך אמיתי. Shu ו-Paraizo Ashtekar מרחיבים את החוק הראשון והשני לחורים שחורים המרוחקים כרצוננו משיווי משקל — מתמזגים, בולעים חומר או נרגעים לאחר אירוע —

באמצעות "אופקים דינמיים" המוגדרים מקומית ומיפוי שמייחס לחור שחור משתנה טמפרטורה וספין רגועים. התוצאה היא ששטח האופק נשאר המידה הנכונה לאנטרופיה גם במהלך אירועים אלימים. זו תוצאה קשיחה ביחסות כללית קלאסית, לא כבידה קוונטית, לא תצפית, לא ספירת מיקרו-מצבים ולא פתרון לפרדוקס המידע.

בדיקה מפוכחת

מה המאמר מראה: הרחבה מתמטית עקבית של החוק הראשון והשני של מכניקת חורים שחורים לחורים שחורים דינמיים לחלוטין והרחק משיווי משקל, המבוססת על אופקים דינמיים quasi-local. היא מגדירה חוק ראשון סופי ומבוסס-תהליך וחוק שני כמותי, והופכת לטבעי את הזהוי של אנטרופיית חור שחור דינמי עם שטח האופק שלו.

מה אמיתי אך פרשני: הזהוי "אנטרופיה = שטח אופק" מחוץ לשיווי משקל. החוקים החדשים הופכים אותו למשכנע, אבל הוא יורש את הנחת שטח-אנטרופיה הקלאסית הסטנדרטית במקום לגזור אותה.

מה הוא אינו מראה: תורת כבידה קוונטית; מקור מיקרוסקופי או "ספירה" של אנטרופיית חור שחור; פתרון לפרדוקס המידע; תוצאה תצפיתית או ניסויית; טמפרטורה שאפשר למדוד פיזית.

המגבלות העיקריות: יחסות כללית קלאסית לכל אורך הדרך; התוצאות המרכזיות מוכחות למקרה הנפוץ של אופקים דמויי-מרחב ובעלי סימטריה צירית, עם הכללה הנתמכת בעבודה נלווית; זיהוי שטח-אנטרופיה מונח ולא נגזר ממכניקה סטטיסטית.

כמה ביטחון צריך להיות לקורא כללי? ביטחון גבוה שזו התקדמות תאורטית מוצקה ומוערכת שמרחיבה באמת את תרמודינמיקת החורים השחורים למשטר הדינמי. ובאותה מידה ביטחון גבוה שזו לא טענה על תצפיות חדשות, לא כבידה קוונטית ולא פתרון לחידת המידע המפורסמת. הגישה הנכונה: צעד אמיתי בהבנה, שנעשה בגיר ולא בטלסקופ.

מקורות

251405, 136 Lett. Rev. Phys. Equilibrium, from Far Holes, Black of Thermodynamics Shu, & Paraizo Ashtekar, (2026)

<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>