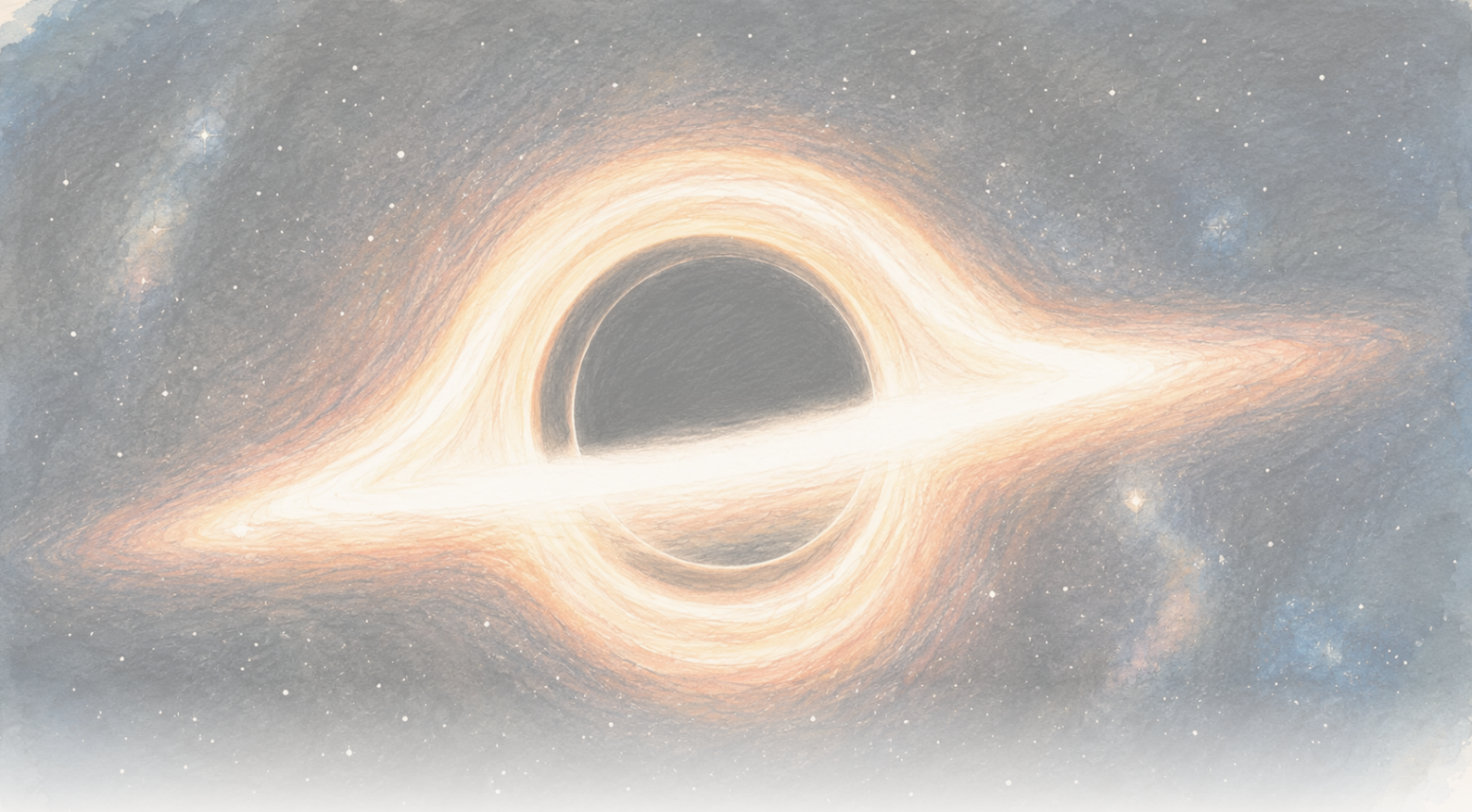




The CLEAN PAPER

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, אך הניסוח הנקי ביותר חל רק על חורים שחורים היושבים בשקט בשיווי משקל. מאמר חדש ב-*Letters Review Physical* מרחיב את החוק הראשון והשני לאותם חלקים של אופקים קוואזי-מקומיים העומדים בתנאים של מקטעי אופק דינמי ויכולים להיות רחוקים כרצוננו משיווי משקל — במהלך ספיחה, קריסה וברוב שלבי מיזוג של חורים שחורים. הסימולציות עוקבות אחר האופק הקוואזי-מקומי לאורך המיזוג כולו, אך החוקים עדיין אינם מכסים את פרק הזמן הקצר סביב ההתלכדות שבו הוא אינו מקטע אופק דינמי. מסגרת היסוד היא ביחסות כללית, עם יישום סמיקלאסי להתאדות, אין מדובר בכבידה קוונטית חדשה, בתצפית או בפתרון לחידת 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 האינסוף האפסי העתידי — $infty, null future$ המסומן ^+I — כיעד שאליו מגיע אור שבורח לנצח אל עתיד ריק ואינסופי. 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 האינסוף האפסי העתידי: $J^+(\mathcal{I})$. 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 מבסס את תוצאתו על מושג אחר של אופק — מושג קוואזי-מקומי, המוגדר רק על סמך הגאומטריה בסביבתו שלו, ללא התייחסות לעתיד האינסופי. האופקים הקוואזי-מקומיים האלה הם המשטחים שחוקרי יחסות נומרית כבר משתמשים בהם כדי לאתר את החורים השחורים המקוריים, לעקוב אחר המיזוג ולאתר את השריד לאורך הסימולציה כולה. חוקי התרמודינמיקה שפותחו כאן חלים על אותם חלקים באופק קוואזי-מקומי שעומדים בתנאים הנוספים של מקטע אופק דינמי. בכל מקטע כזה השטח משתנה בתגובה ישירה לשטף האנרגיה המקומי, ולא לאירועים בעתיד הרחוק. הוא גדל תחת שטף חיובי פנימה, ובמקרה של אופק דמוי-זמן מתאדה עם שטף אנרגיה שלילי — קטן.

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 בשיווי משקל — חור שחור Kerr — נקבע על ידי שני מספרים בלבד: הגודל שלו והספין שלו. לכן המחברים בונים מיפוי שלוקח כל מצב לאורך מקטע אופק דינמי, ובכל חתך רוחב של אותו מקטע קורא את שני המספרים של חור השחור בשיווי משקל שהמצב דומה לו באותו רגע. דרך המיפוי הזה אפשר לייחס לחור שחור משתנה באלימות טמפרטורה וספין תלויי-זמן לאורך המקטע.

באמצעות המרכיבים האלה — אנרגיה המוגדרת מקומית וזורמת דרך האופק, וגדלים אינטנסיביים רגועים — הם מרחיבים את החוק הראשון לחורים שחורים הרחוקים כרצוננו משיווי משקל. חשוב במיוחד, החוק החדש מתאר שינויים סופיים הנגרמים מתהליכים פיזיקליים ממשיים (חומר וגלי כבידה החוצים את האופק), ולא צעדים אינפיניטסימליים בין שני מצבים קפואים. הם מצרפים לו חוק שני תואם, שניסוחו כעת כמותי: השינוי בשטח האופק קשור ישירות לשטף האנרגיה המקומי — גדילה תחת שטף חיובי פנימה, או הקטנה של אופק דמוי-זמן מתאדה תחת שטף שלילי. יחד, החוק הראשון והשני מובילים למסקנה אחת ברורה: בכל שלב המיוצג באמצעות מקטע אופק דינמי, אלים ככל שיהיה, המידה הנכונה לאנטרופיה נותרת שטח האופק.

מה זה לא מוכיח

- הוא אינו פותר את הכבידה הקוונטית. מסגרת היסוד מנוסחת ביחסות כללית; היישום שלה להתאדות חורים שחורים משתמש בקירוב הסמי-קלאסי, שבו שדות חומר קוונטיים פועלים על מרחב-זמן קלאסי. היא עדיין מניחה את הזיהוי המקובל של שטח האופק עם אנטרופיה, במקום לגזור את האנטרופיה ממשווא 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 אינה תצפית או מדידה. אין כאן טלסקופ, נתונים או אות של גלי כבידה — זו מתמטיקה. ה"טמפרטורה" המיוחסת לאופק דינמי במהלך התפתחותו של חור שחור היא גודל המוגדר במדויק במשוואות, ולא משהו שאפשר לקרוא במדחום.
- הוא עדיין אינו מספק תיאור תרמודינמי רציף של כל תהליך ההתלכדות של שני חורים שחורים. סימולציות נומריות עוקבות אחר האופק הקוואזי-מקומי לאורך כל ההתפתחות — מן החורים המקוריים, דרך המיזוג ועד השריד — אך במשך פרק זמן קצר סמוך מאוד למיזוג, אותו אופק אינו עומד בתנאים הנדרשים ממקטע אופק דינמי. לפי המאמר הנלווה, גיבושו של תיאור תרמודינמי לפרק זמן זה עדיין מצוי בעבודה.
- זה לא הופך את Hawking ו-Bekenstein. הוא מרחיב את התמונה שלהם למשטר הדינמי שבו החוק המקורי, שהוגבל לשיווי משקל, לא אמר דבר.

עד כמה הראיות חזקות?

חזקות, בהתחשב בטיב העבודה: מחקר זהיר ועקבי פנימית בפיזיקה מתמטית, מאת קבוצה מובילה בתחום, שפורסם ב-*Suggestion Editors' Review Physical Letters*. מאמר נלווה שעבר ביקורת עמיתים מציג את הגזירות הארוכות יותר ומטפל במקרים שקוצרו והושמטו מן ה-Letter.

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.

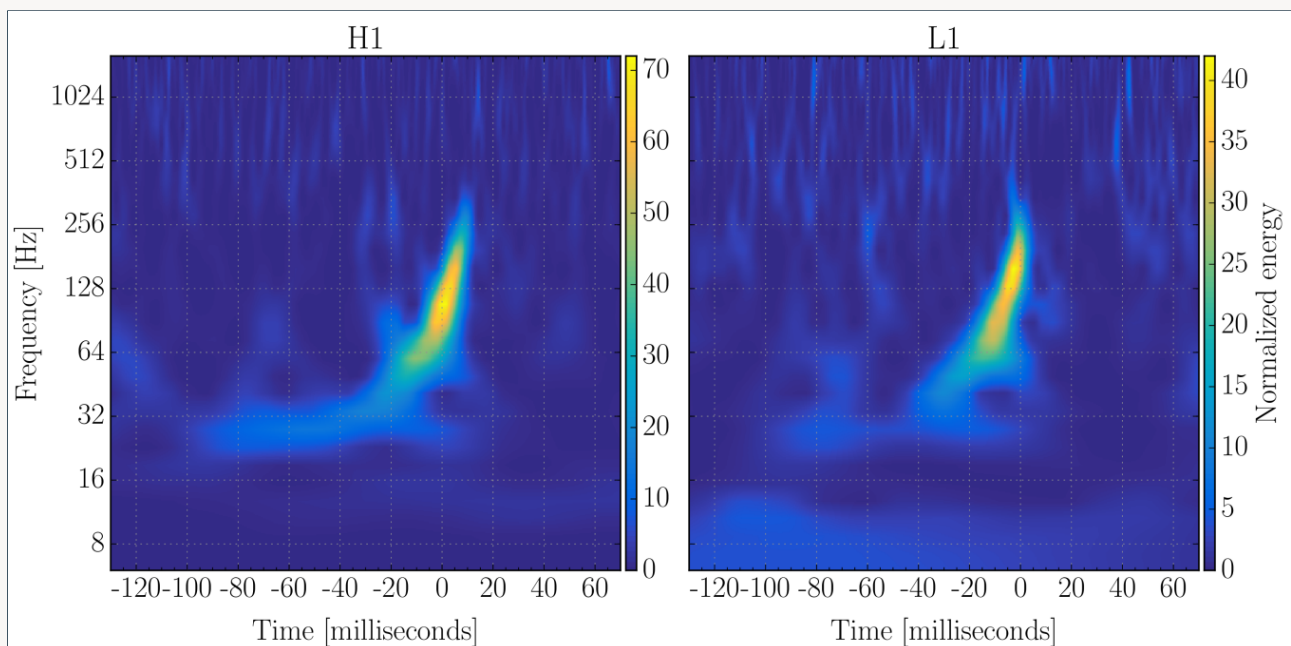
- לשם קיצור ופשטות, ה-Letter הקצר מציג את הגזירה העיקרית באמצעות אופקים דינמיים דמויי-מרחב ובעלי סימטריה צירית. המאמר הנלווה שעבר ביקורת עמיתים מנתח במפורש אופקים דינמיים דמויי-זמן ובונה תנע זוויתי ללא שדה קילינג סיבובי. עם זאת, במקרה של אופקים דמויי-זמן מתאדים, רק הטיפול המפורש בתגובת-הנגד מוגבל לסימטריה כדורית.
- “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.

מבחינה מעשית, החורים השחורים שאנו חוקרים כיום בפועל — אלה ש-LIGO ו-Virgo שומעים מתמזגים — עוברים את רגעייהם החשובים ביותר הרחק משיווי משקל. הסימולציות עוקבות אחר האופק הקוואזי-מקומי מן החורים המקוריים, דרך המיזוג ועד השריד. הגדלים במאמר הזה חלים על אותם חלקים של האופק העומדים בתנאים של מקטעי אופק דינמי, ולכן העבודה מספקת דרך מבוססת לדבר על האנטרופיה והטמפרטורה של חור שחור לאורך רוב שלבי התפתחות המיזוג ובמהלך קריסה, ולא רק לאחר שהכול נרגע. במשך פרק הזמן הקצר ממש סביב ההתלכדות ממשיכים לעקוב אחר האופק הקוואזי-מקומי, אך הוא נמצא מחוץ לתיאור התרמודינמי הנוכחי.



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 שמשנתנה באלומות 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 לחוקי התרמודינמיקה, אך הניסוח הנקי של "החוק הראשון" מ-1973 השווה רק חורים שחורים הנמצאים במנוחה ובשיווי משקל, ולא היה יכול לתאר תהליך ממשי. Paraizo Ashtekar, Shu-i מרחיבים הן את החוק הראשון והן את החוק השני לחורים שחורים הרחוקים כרצוננו משיווי משקל — תוך ספיחת חומר, קריסה, דעיכה תנודתית ומעבר ברוב שלבי המיזוג — באמצעות אופקים קוואזי-מקומיים, החלת חוקי התרמודינמיקה על מקטעי האופק הדינמי שלהם ובניית מיפוי המייחס לכל מצב לאורך אותם מקטעים טמפרטורה וספין רגועים. המסקנה היא ששטח האופק נותר המידה הנכונה לאנטרופיה בכל שלב המיוצג באמצעות מקטע אופק דינמי. פרק הזמן הקצר סמוך מאוד להתלכדות עדיין אינו מכוסה בתיאור התרמודינמי הזה, אף שהסימולציות ממשיכות לעקוב אחר האופק הקוואזי-מקומי. מסגרת היסוד היא ביחסות כללית, עם יישום סמי-קלאסי להתאדות; אין מדובר בכבידה קוונטית, בתצפית, בספירת מיקרו-מצבים או בפתרון 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 קוואזי-מקומיים ועל אותם חלקים שלהם שעומדים בתנאים של מקטעי אופק דינמי. היא מגדירה חוק ראשון סופי ומבוסס-תהליך וחוק שני כמותי, והופכת לטבעי את הזיהוי של אנטרופיית חור שחור דינמי עם שטח האופק שלו.

מה אמיתי אך פרשני: הזיהוי "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: גזירת היסוד היא במסגרת היחסות הכללית, ואילו היישום להתאדות של אופק דמוי-זמן משתמש בקירוב הסמי-קלאסי; פרק הזמן הקצר סמוך מאוד להתלכדות בינארית אינו מיוצג באמצעות מקטע אופק דינמי, והתיאור התרמודינמי שלו עדיין מצוי בעבודה, אף שסימולציות נומריות ממשיכות לעקוב אחר האופק הקוואזי-מקומי; הטיפול המפורש בתגובת-הנגד של אופקים דמויי-זמן מתאדים מוגבל לסימטריה כדורית; הזיהוי בין שטח לאנטרופיה מונח כהנחה ואינו מוכח מתוך המכניקה הסטטיסטית.

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.

עדכונים לאחר הפרסום

• תיקון · 2026-08-27

בעקבות משוב מן המחבר המתכתב Ashtekar, Abhay תיקנו שתי קביעות שתיארו את המקרים דמויי-הזמן והלא-ציריים כאילו רק נטען שהם תקפים, במקום לומר שהם מטופלים במפורש במאמר הנלווה שעבר ביקורת עמיתים. במהלך הבדיקה הבהרנו גם שהמסגרת עדיין אינה מכסה את פרק הזמן הקצר סמוך מאוד להתלכדות בינארית, שבו האופק הקוואזי-מקומי אינו עומד בתנאים הנדרשים ממקטע אופק דינמי.

• תיקון · 2026-08-28

בעקבות הבהרה נוספת מאת המחבר האחראי להתכתבות Ashtekar, Abhay הבחנו בין אופקים קוואזי-מקומיים, שסימולציות נומריות עוקבות אחריהם מן החורים השחורים המקוריים דרך המיזוג ועד השריד, לבין החלקים העומדים בתנאים הנוספים של מקטעי אופק דינמי, שבהם חלים חוקי התרמודינמיקה.

מקורות

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

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

Gravit. Relativ. Gen. theory, perturbation beyond holes black dynamical of Thermodynamics Shu, & Paraizo Ashtekar, (2026) 91, 58

<https://doi.org/10.1007/s10714-026-03585-4>