



The CLEAN PAPER

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

سیاه‌چاله‌ها از «قوانین» ترمودینامیکی پیروی می‌کنند — نتیجه‌ای تازه آن‌ها را به سیاه‌چاله‌های شدیداً خارج از تعادل گسترش می‌دهد

از دهه 1970 می‌دانیم سیاه‌چاله‌ها از قوانینی پیروی می‌کنند که بازتاب ترمودینامیک‌اند، اما روشن‌ترین صورت این قوانین فقط برای سیاه‌چاله‌هایی کاربرد داشت که آرام در تعادل بودند. مقاله‌ای تازه در *Letters Review Physical* قانون اول و دوم را به بخش‌هایی از افق‌های شبه‌موضعی تعمیم می‌دهد که شرایط قطعه‌های افق دینامیکی را دارند و می‌توانند به‌طور دلخواه از تعادل دور باشند — هنگام برافزایش، رمبش و بیشتر مراحل ادغام سیاه‌چاله‌ها. شبیه‌سازی‌ها افق شبه‌موضعی را در سراسر ادغام دنبال می‌کنند، اما این قوانین هنوز بازه کوتاه پیرامون یکی شدن را، هنگامی که افق یک قطعه افق دینامیکی نیست، پوشش نمی‌دهند. چارچوب بنیادی در نسبیت عام است و تخییر را به‌صورت نیمه‌کلاسیک به کار می‌بندد؛ این نه گرانش کوانتومی تازه است، نه مشاهده و نه راه‌حلی برای معمای اطلاعات سیاه‌چاله.

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: 1103/3c1r-v8f1.10

سیاه چاله ها «قوانینی» شبیه ترمودینامیک دارند. نسخه مرتب آن فقط وقتی کار می کرد که هیچ اتفاقی نمی افتاد

یکی از عجیب ترین واقعیت های فیزیک این است که سیاه چاله ها مانند اجسام گرم رفتار می کنند. در اوایل دهه 1970، Bekenstein و Hawking متوجه شدند معادلات حاکم بر سیاه چاله ها، جمله به جمله، با قوانین ترمودینامیک هم راستا هستند: سیاه چاله آنتروپی ای متناسب با مساحت افق خود و دمایی متناسب با گرانش سطحی اش دارد. Hawking سپس نشان داد این دما در عمیق ترین معنا واقعی است — سیاه چاله واقعاً، هرچند بسیار کم نور، تابش گرمایی گسیل می کند.

تابش هاوکینگ چیست؟

در Stephen Hawking باشد. دما بدون و سیاه کاملاً باید بنابراین نمی گریزد، سیاه چاله از چیز هیچ کلاسیک فیزیک در وضعیتی بسیار گرمایی تابش سیاه چاله می کند: تغییر تصویر این کنیم وارد افق نزدیک را کوانتومی نظریه وقتی داد نشان 1974 حالی در است، گرمایی هاوکینگ دمای در طیف می شود. «تبخیر» یا می دهد دست از جرم به آرامی نتیجه در و می کند منتشر واقعی استنتاج که — راجع شهودی تصویر یک در می دهد. تغییر می رسد بی نهایت به که را تابشی خمیده فضا زمان در انتشار که و می گریزد تابش به صورت اعضا از یکی که می سازند جفت هایی افق بیرون درست کوانتومی نوسان های — نیست Hawking می کند. سقوط دیگری ویژگی کلیدی این است که این دما با جرم سیاه چاله نسبت وارون دارد: هرچه سیاه چاله کوچک تر باشد، داغ تر است. برای هر سیاه چاله ای که تلسکوپ بتواند ببیند، دما فوق العاده پایین است — بسیار سردتر از فضای اطراف — بنابراین در عمل این درخشش ناچیز است و هرگز مستقیماً اندازه گیری نشده. اهمیت آن مفهومی است: تابش هاوکینگ چیزی است که شباه میان مکانیک سیاه چاله و ترمودینامیک را به واقعیت ترمودینامیکی تبدیل می کند. چون سیاه چاله واقعاً دما دارد، «دما» و «آنتروپی» در این قوانین کمیت های واقعی ترمودینامیکی اند، نه تصادفی صوری. (این زمینه مقاله حاضر است، نه یکی از نتایج آن.)

این تناظر بر نتیجه ای به نام قانون اول مکانیک سیاه چاله (Carter (Bardeen و Hawking، 1973) تکیه دارد. به زبان ساده می گوید: اگر سیاه چاله ای را کمی از یک حالت پایدار به حالت پایدار نزدیک دیگری ببرید، تغییر جرم آن برابر است با دمایش ضرب در تغییر آنتروپی، به علاوه جمله ای مربوط به چرخش. نسخه سیاه چاله ای این ایده است که «گرمای وارد شده برابر دما ضرب در تغییر آنتروپی است».

اما یک مشکل در عبارت حالت پایدار نزدیک پنهان است. قانون تمیز 1973 دو سیاه چاله را که در تعادل آرام نشسته اند و فقط بی نهایت اندکی متفاوت اند مقایسه می کند. در واقع هیچ فرایندی را توصیف نمی کند — سیاه چاله ای که ستاره ای را می بلعد، دو سیاه چاله که ادغام می شوند، یا سیاه چاله تازه زاده ای که پس از تولدی خشن زنگ وار فروکش می کند. این ها دقیقاً موقعیت هایی اند که بیش از همه می خواهیم بفهمیم و درست برعکس «آرام نشستن» هستند. قانون مرتب دقیقاً وقتی سیاه چاله جالب می شود ساکت می ماند.

چرا راه حل بدیهی جواب نمی دهد؟

ممکن است فکر کنید راه حل آسان است: فقط رشد افق را هنگام سقوط ماده دنبال کنید. مشکل این است که کدام افق؟

افقی که بیشتر مردم تصور می کنند — افق رویداد، مرز واقعی بازگشت ناپذیری — ویژگی ظریف و ناخوشایندی دارد: با کل آینده جهان تعریف می شود. برای دانستن این که افق رویداد همین حالا کجاست، باید بدانید تا ابد چه چیزهایی در آینده درون سیاه چاله خواهند افتاد. این یک نکته فنی بی اهمیت نیست. افق رویداد می تواند در ناحیه ای کاملاً خالی و تخت از فضا پیش از رسیدن ماده ای که قرار است آن را تغذیه کند شروع به رشد کند، فقط چون آن ماده در آینده قطعاً خواهد رسید. مساحت آن می تواند جایی افزایش یابد که در همان

حل، هیچ اتفاقی در حال رخ دادن نیست.

چگونه افق می‌تواند پیش از رسیدن ماده رشد کند؟

نیست معنا این به این‌جا در «غایت‌شناختی» است. آن سراسری تعریف یا رویداد افق غایت‌شناختی ماهیت مسئله این علمی نام قرار افق درون رویداد یک آیا این که یعنی می‌فرستد. زمان در عقب به تأثیری یا می‌کند پیش‌بینی را آینده دارد، هدفی افق که است. تعیین قابل فضا زمان آینده کامل تاریخیچۀ دانستن با فقط نه یا می‌گیرد تعریف رسمی همان نکته را فشرده‌تر بیان می‌کند. بی‌نهایت نولی آینده — که «آی‌پلاس» خوانده می‌شود و I^+ نوشته می‌شود — را مقصدی تصور کنید که نوری که برای همیشه به بیرون می‌گردد در آینده‌ای بی‌نهایت دور و در فضایی در نهایت تهی به آن می‌رسد. افق رویداد مرز میان رویدادهایی است که از آن‌ها یک سیگنال نوری رو به بیرون در نهایت می‌تواند به این مقصد برسد و رویدادهایی که از آن‌ها هیچ سیگنالی هرگز نمی‌رسد. در نمادگذاری استاندارد نسبیت عام، مرز گذشته‌ی علی بی‌نهایت نولی آینده است: $J^-(I^+)$. چون واژه هرگز/در نهایت در خود تعریف وجود دارد، هیچ اندازه‌گیری فقط در این‌جا و اکنون نمی‌تواند مکان دقیق افق رویداد را تعیین کند.

پوسته‌ی کروی در حال رمبش عجیب‌بودن را آشکار می‌کند. پیش از رسیدن پوسته، ناحیه‌ی درون آن می‌تواند خالی و از نظر محلی تخت باشد. پرتوهای نور رو به بیرون را در زمان‌های پیاپی از مرکز بفرستید: پرتوهای زودتر می‌گیرند، اما پرتوهای دیرتر با پوسته در حال رمبش در هندسه‌ای برخورد می‌کنند که دیگر امکان خروج ندارد. افق رویداد مرز جداکننده این دو سرنوشت است. اگر آن مرز را رو به عقب دنبال کنیم، از مرکز آغاز می‌شود و در درون هنوز خالی و تخت، پیش از رسیدن پوسته، گسترش می‌یابد. افزایش مساحت آن جریان محلی ماده در آن‌جا را گزارش نمی‌کند؛ ثبت می‌کند در فضا زمان کامل شده کدام مسیرهای گریز همچنان باز می‌مانند.

هیچ چیز در این تصویر به عقب در زمان عمل نمی‌کند. اگر پوسته منحرف می‌شد و هیچ سیاه‌چاله‌ای شکل نمی‌گرفت، فضا زمان کامل شده متفاوت بود و آن ناحیه پیشین هرگز بخشی از افق رویداد محسوب نمی‌شد. درس این نیست که آینده گذشته را تغییر می‌دهد، بلکه این است که افق رویداد یک مرز علی سراسری است، نه سطحی که ناظر نزدیک در یک لحظه بتواند آشکارش کند. دقیقاً به همین دلیل فیزیک‌دانان وقتی می‌خواهند تغییر سیاه‌چاله را دنبال کنند از افق‌های شبه‌موضعی یا دینامیکی استفاده می‌کنند.

این ویژگی افق رویداد را برای گزارش لحظه‌به‌لحظه «حالت» سیاه‌چاله نامناسب می‌کند. حتی در شبیه‌سازی رایانه‌ای نیز تا پایان شبیه‌سازی نمی‌توانید مکان آن را دقیقاً تعیین کنید، چه رسد به این که دما یا آنروپی را لحظه‌به‌لحظه با آن دنبال کنید.

حرکت اصلی: افقی که می‌توان محلی تعریف کرد

مقاله تازه Shu Jonathan و Paraizo Daniel Ashtekar، Abhay که فقط با هندسه همسایگی خودش و بدون هیچ ارجاعی به آینده بی‌نهایت تعریف می‌شود. این افق‌های شبه‌موضعی همان سطوحی هستند که نسبیت‌دانان عددی از پیش برای مکان‌یابی سیاه‌چاله‌های اولیه، دنبال کردن ادغام و مکان‌یابی سیاه‌چاله به‌جامانده در سراسر یک شبیه‌سازی به کار می‌برند. قوانین ترمودینامیکی توسعه‌یافته در اینجا بر بخش‌هایی از افق شبه‌موضعی اعمال می‌شوند که شرایط اضافی لازم برای یک قطعه افق دینامیکی را برآورده کنند. در هر چنین قطعه‌ای، مساحت در پاسخ مستقیم به شار موضعی انرژی تغییر می‌کند، نه در پاسخ به رویدادهایی در آینده دور: با شار ورودی مثبت افزایش می‌یابد و برای افق زمان‌گونه در حال تبخیر با شار انرژی منفی کاهش پیدا می‌کند.

روی این پایه، نویسندگان نیمه دشوارتر مسئله را نیز حل می‌کنند. در ترمودینامیک معمول، سامانه‌ای بسیار دور از تعادل لغزنده و بدتعریف است: نمی‌توان به‌سادگی دما یا فشار واحدی به آن نسبت داد، چون این کمیت‌ها فقط وقتی چیزها آرام می‌شوند تعریف روشنی دارند. سیاه‌چاله‌ها هم همین مشکل را دارند — تا زمانی که، به گفته نویسندگان، از یک ویژگی ویژه نسبیت عام استفاده کنیم. سیاه‌چاله در

تبادل (یک سیاه‌چاله کر) فقط با دو عدد مشخص می‌شود: اندازه و چرخش. بنابراین نویسندگان نگاهی می‌سازند که هر حالت در امتداد یک قطعه افق دینامیکی را می‌گیرد و در هر برش از آن قطعه، دو عدد سیاه‌چاله تعادلی را می‌خواند که آن حالت در همان لحظه به آن شباهت دارد. با این نگاشت، می‌توان در امتداد قطعه به سیاه‌چاله‌ای که به شدت در حال تغییر است دما و چرخش وابسته به زمان نسبت داد.

آن‌ها با این اجزا – انرژی تعریف شده به صورت موضعی که از افق می‌گذرد و کمیت‌های شدت لحظه‌ای – قانون اول را به سیاه‌چاله‌هایی تعمیم می‌دهند که می‌توانند به طور دلخواه از تعادل دور باشند. نکته اساسی این است که قانون تازه تغییرات متناهی ناشی از فرایندهای فیزیکی واقعی – عبور ماده و امواج گرانشی از افق – را توصیف می‌کند، نه گام‌های بی‌نهایت کوچک میان دو حالت منجمد. آن‌ها این قانون را با قانون دوم متناظری همراه می‌کنند که بیان آن اکنون کمی است: تغییر مساحت افق مستقیماً به شار موضعی انرژی پیوند دارد – افزایش تحت شار ورودی مثبت، یا کاهش برای افق زمان‌گونه در حال تبخیر تحت شار منفی. قانون اول و دوم در کنار هم به یک نتیجه روشن می‌رسند: برای هر مرحله‌ای که با یک قطعه افق دینامیکی نمایش داده می‌شود، هر قدر هم خشن باشد، مساحت افق همچنان سنجۀ درست آنتروپی است.

این پژوهش چه چیزی را ثابت نمی‌کند؟

- گرانش کوانتومی را حل نمی‌کند. چارچوب بنیادی در نسبیت عام صورت‌بندی شده است؛ کاربرد آن برای تبخیر سیاه‌چاله از تقریب نیه‌کلاسیک استفاده می‌کند که در آن میدان‌های کوانتومی ماده بر فضازمانی کلاسیک اثر می‌گذارند. این چارچوب همچنان همان هم‌ارزی متعارف مساحت افق و آنتروپی را فرض می‌کند، نه اینکه آنتروپی را از چیزی بنیادی‌تر به دست آورد.
- ریزحالت‌ها را نمی‌شمارد و توضیح نمی‌دهد آنتروپی سیاه‌چاله از چه چیزی ساخته شده است. حسابداری ترمودینامیک سیاه‌چاله را گسترش می‌دهد؛ جعبه را باز نمی‌کند تا درجات آزادی میکروسکوپی را نشان دهد.
- پارادوکس اطلاعات سیاه‌چاله را حل نمی‌کند. آن مسئله در نظریه کوانتومی زندگی می‌کند؛ این مقاله به آن نمی‌پردازد.
- مشاهده یا اندازه‌گیری نیست. هیچ تلسکوپ، داده یا سیگنال موج گرانشی در کار نیست – این ریاضیات است. «دمایی» که هم‌زمان با تحول سیاه‌چاله به افق دینامیکی نسبت داده می‌شود، کمیتی با تعریف دقیق در معادلات است، نه چیزی که بتوان آن را از روی دماسنج خواند.
- هنوز توصیفی ترمودینامیکی و پیوسته از کل فرایند یکی شدن دو سیاه‌چاله ارائه نمی‌دهد. شبیه‌سازی‌های عددی افق شبه‌موضعی را در سراسر تحول – از سیاه‌چاله‌های اولیه، از میان ادغام، تا سیاه‌چاله به‌جامانده – دنبال می‌کنند، اما در بازه‌ای کوتاه بسیار نزدیک به ادغام، آن افق شرایط لازم برای یک قطعه افق دینامیکی را برآورده نمی‌کند. مقاله همراه می‌گوید ارائه شرحی ترمودینامیکی از آن بازه همچنان در دست بررسی است.
- **Hawking و Bekenstein** را کنار نمی‌زند. تصویر آن‌ها را به رژیم دینامیکی‌ای گسترش می‌دهد که قانون اصلی فقط-تعادلی درباره‌اش چیزی نمی‌گفت.

شواهد چقدر قوی‌اند؟

برای آنچه هست، شواهد قوی‌اند: اثری دقیق و از نظر درونی سازگار در فیزیک ریاضی، از گروهی پیشرو در این حوزه، که به عنوان 'Suggestion Editors' در *Letters Review Physical* منتشر شده است. یک مقاله همراه داوری شده استنتاج‌های مفصل‌تر را ارائه می‌کند و به مواردی می‌پردازد که برای اختصار از Letter کوتاه حذف شده‌اند.

احتیاط‌های صادقانه درباره نوع نتیجه‌اند، نه کیفیت آن:

- کار بر فرض متعارف استوار است که مساحت افق همان آنتروپی است (مساحت تقسیم بر چهار برابر ثابت نیوتن و ثابت پلانک، با

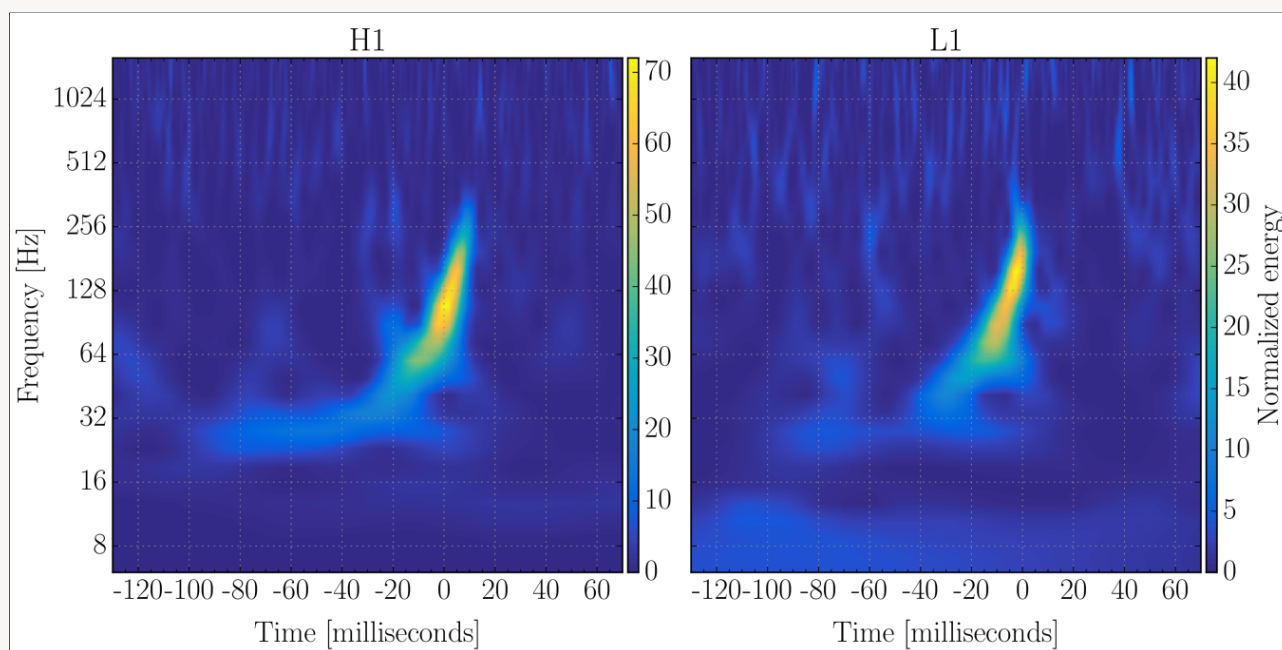
- واحدهای مناسب). اگر روزی نظریه کامل گراش کوانتومی این شناسایی را اصلاح کند، تفسیر نیز همراه آن تغییر خواهد کرد.
- Letter کوتاه برای اختصار و سادگی، استنتاج اصلی را با استفاده از افق‌های دینامیکی فضاگونه و دارای تقارن محوری ارائه می‌کند. مقاله همراه داوری شده افق‌های دینامیکی زمان گونه را به صراحت تحلیل می‌کند و تکانه زاویه‌ای را بدون میدان کلینگ دورانی می‌سازد. باین حال، برای افق‌های زمان گونه در حال تجزیه، بررسی صریح پس واکنش به تقارن کروی محدود است.
- «آنتروپی برابر مساحت افق است، حتی خارج از تعادل» شناسایی قانع کننده‌ای است که قوانین تازه آن را طبیعی می‌کند — نه قضیه‌ای که از آمار میکروسکوپی اثبات شده باشد.

بنابراین: تعمیمی دقیق از چارچوبی پنجاه ساله، نه کشف آزمایشی و نه قانون فیزیکی تازه‌ای که منتظر آزمون باشد.

چرا اهمیت دارد؟

دو دلیل دارد، یکی عملی و یکی مفهومی.

از نظر عملی، سیاه‌چاله‌هایی که اکنون واقعاً مطالعه می‌کنیم — همان‌هایی که LIGO و Virgo صدای ادغامشان را می‌شنوند — مهم‌ترین لحظاتی را بسیار دور از تعادل می‌گذرانند. شبیه‌سازی‌ها افق شبه‌موضعی را از سیاه‌چاله‌های اولیه، از میان ادغام، تا سیاه‌چاله به‌جامانده دنبال می‌کنند. کیفیت‌های این مقاله بر بخش‌هایی از آن افق اعمال می‌شوند که شرایط قطعه افق دینامیکی را دارند؛ بنابراین راهی اصولی برای سخن گفتن از آنتروپی و دمای سیاه‌چاله در بیشتر مراحل تحول ادغام و هنگام رمبش فراهم می‌کنند، نه فقط پس از آنکه همه چیز آرام گرفته باشد. در بازه کوتاه دقیقاً پیرامون یکی شدن، افق شبه‌موضعی همچنان دنبال می‌شود، اما بیرون از توصیف ترمودینامیکی کنونی قرار می‌گیرد.



GW150914، نخستین سیگنال موج گرانشی که مستقیماً آشکار شد، از ادغام دو سیاه‌چاله آمد. این نقشه‌های زمان-فرکانس سیگنال را در LIGO Hanford (چپ) و Livingston LIGO (راست) نشان می‌دهند: در هر دو آشکارساز، رد روشن با افزایش فرکانس سیگنال به سوی لحظه ادغام رو به بالا می‌رود. این نمونه‌ای واقعی از سامانه سیاه‌چاله‌ای بسیار دور از تعادل است؛ زمینه‌ای برای چارچوب ترمودینامیکی تازه، نه شاهد رصدی برای آن.

از نظر مفهومی، رفتار ترمودینامیکی سیاه‌چاله‌ها یکی از محدود سرخ‌های عینی ما دربارهٔ گرایش کوانتومی است — جایی که گرایش، نظریهٔ کوانتومی و ترمودینامیک آشکارا به هم می‌رسند. دقیق‌تر کردن معنای «آنتروپی» و «دما» برای سیاه‌چاله‌ای که به شدت تغییر می‌کند، هدفی را که هر نظریهٔ کوانتومی آینده باید بزند دقیق‌تر می‌کند. پاسخ پرسش عمیق «آنتروپی سیاه‌چاله واقعاً چیست؟» را نمی‌دهد. پرسش را دقیق‌تر صورت‌بندی می‌کند — و در این گوشهٔ فیزیک، بخش بزرگی از کار همین است.

خلاصهٔ روشن

سیاه‌چاله‌ها از قوانینی پیروی می‌کنند که بازتاب قوانین ترمودینامیک‌اند، اما «قانون اول» روشن سال 1973 فقط سیاه‌چاله‌های ساکن در تعادل را مقایسه می‌کرد و نمی‌توانست فرایندی واقعی را توصیف کند. Shu و Paraizo Ashtekar با استفاده از افق‌های شبه‌موضعی، اعمال قوانین ترمودینامیکی بر قطعه‌های افق دینامیکی آنها و ساختن نگاشتی که به هر حالت در امتداد آن قطعه‌ها دما و چرخش لحظه‌ای نسبت می‌دهد، هم قانون اول و هم قانون دوم را به سیاه‌چاله‌هایی تعمیم می‌دهند که به‌طور دلخواه از تعادل دورند — در حال تغذیه، رمبش، فروکش کردن نوسان‌ها و گذر از بیشتر مراحل یک ادغام. حاصل این است که برای هر مرحله‌ای که با یک قطعهٔ افق دینامیکی نمایش داده می‌شود، مساحت افق همچنان سنجۀ درست آنتروپی باقی می‌ماند. بازۀ کوتاه بسیار نزدیک به یکی شدن هنوز در این توصیف ترمودینامیکی پوشش داده نمی‌شود، هرچند شبیه‌سازی‌ها همچنان افق شبه‌موضعی را دنبال می‌کنند. چارچوب بنیادی در نسبیت عام است و تجزیه را به‌صورت نیمه‌کلاسیک به کار می‌بندد؛ این نه گرایش کوانتومی است، نه مشاهده، نه شمارش ریزحالت‌ها و نه راه‌حل پارادوکس اطلاعات.

بررسی بدون اغراق

مقاله چه چیزی نشان می‌دهد: تعمیمی ریاضی و سازگار از قوانین اول و دوم مکانیک سیاه‌چاله به سیاه‌چاله‌های کاملاً دینامیکی و بسیار دور از تعادل، بر پایهٔ افق‌های شبه‌موضعی و بخش‌هایی از آنها که شرایط لازم برای قطعه‌های افق دینامیکی را برآورده می‌کنند. قانون اولی متناهی و مبتنی بر فرایند و قانون دومی کمی تعریف می‌کند و شناسایی آنتروپی سیاه‌چالهٔ دینامیکی با مساحت افقش را طبیعی می‌سازد.

چه چیزی واقعی اما تفسیری است: شناسایی «آنتروپی = مساحت افق» خارج از تعادل. قوانین تازه آن را قانع‌کننده می‌کنند، اما همان فرض استاندارد کلاسیک مساحت-آنتروپی را به ارث می‌برد و آن را استخراج نمی‌کند.

چه چیزی نشان داده نشده است: نظریهٔ کوانتومی گرایش؛ منشأ میکروسکوپی یا «شمارش» آنتروپی سیاه‌چاله؛ حل پارادوکس اطلاعات؛ هیچ نتیجهٔ رصدی یا آزمایشی؛ یا دمایی که بتوان فیزیکی اندازه‌گیری کرد.

محدودیت‌های اصلی: استنتاج بنیادی در نسبیت عام انجام می‌شود، درحالی که کاربرد مربوط به تجزیهٔ زمان‌گونه از تقریب نیمه‌کلاسیک استفاده می‌کند؛ بازۀ کوتاه بسیار نزدیک به یکی شدن یک سامانهٔ دوتایی با قطعه‌ای از افق دینامیکی نمایش داده نمی‌شود و توصیف ترمودینامیکی آن همچنان در دست بررسی است، هرچند شبیه‌سازی‌های عددی به دنبال کردن افق شبه‌موضعی ادامه می‌دهند؛ بررسی صریح پس‌واکنش برای افق‌های زمان‌گونه در حال تجزیه به تقارن کروی محدود است؛ هم‌ارزی مساحت و آنتروپی فرض می‌شود و از مکانیک آماری اثبات نمی‌شود.

یک خوانندهٔ عمومی تا چه حد باید اطمینان داشته باشد؟ اطمینان بالا که این پیشرفتی نظری، جدی و معتبر است که واقعاً ترمودینامیک سیاه‌چاله را به رژیم دینامیکی گسترش می‌دهد. و به همان اندازه اطمینان بالا که نه ادعای مشاهدهٔ تازه است، نه گرایش کوانتومی و نه حل مسئلهٔ مشهور اطلاعات. موضع درست: گامی واقعی در فهم، برداشته‌شده با گچ، نه تلسکوپ.

به روزرسانی های پس از انتشار

• تصحیح • 27-08-2026

پس از دریافت بازخورد Ashtekar، Abhay نویسنده مسئول مکاتبات، دو گزاره را اصلاح کردیم که موارد زمان گونه و نامحورمقارن را صرفاً استدلال شده توصیف کرده بودند، نه مواردی که در مقاله همراه داوری شده به صراحت بررسی شده اند. در جریان بازبینی همچنین روشن کردیم که این چارچوب هنوز بازه کوتاه بسیار نزدیک به یکی شدن یک سامانه دوتایی را پوشش نمی دهد؛ بازه ای که در آن افق شبه موضعی دیگر شرایط یک قطعه افق دینامیکی را برآورده نمی کند.

• تصحیح • 28-08-2026

در پی توضیح بیشتر نویسنده مسئول، Ashtekar، Abhay میان افق های شبه موضعی که شبیه سازی های عددی آنها را از سیاه چاله های اولیه، از میان ادغام، تا سیاه چاله به جامانده دنبال می کنند و بخش هایی که شرایط اضافی لازم برای قطعه های افق دینامیکی را برآورده می کنند و قوانین ترمودینامیکی بر آنها اعمال می شود، تمایز گذاشتیم.

منابع

- 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>