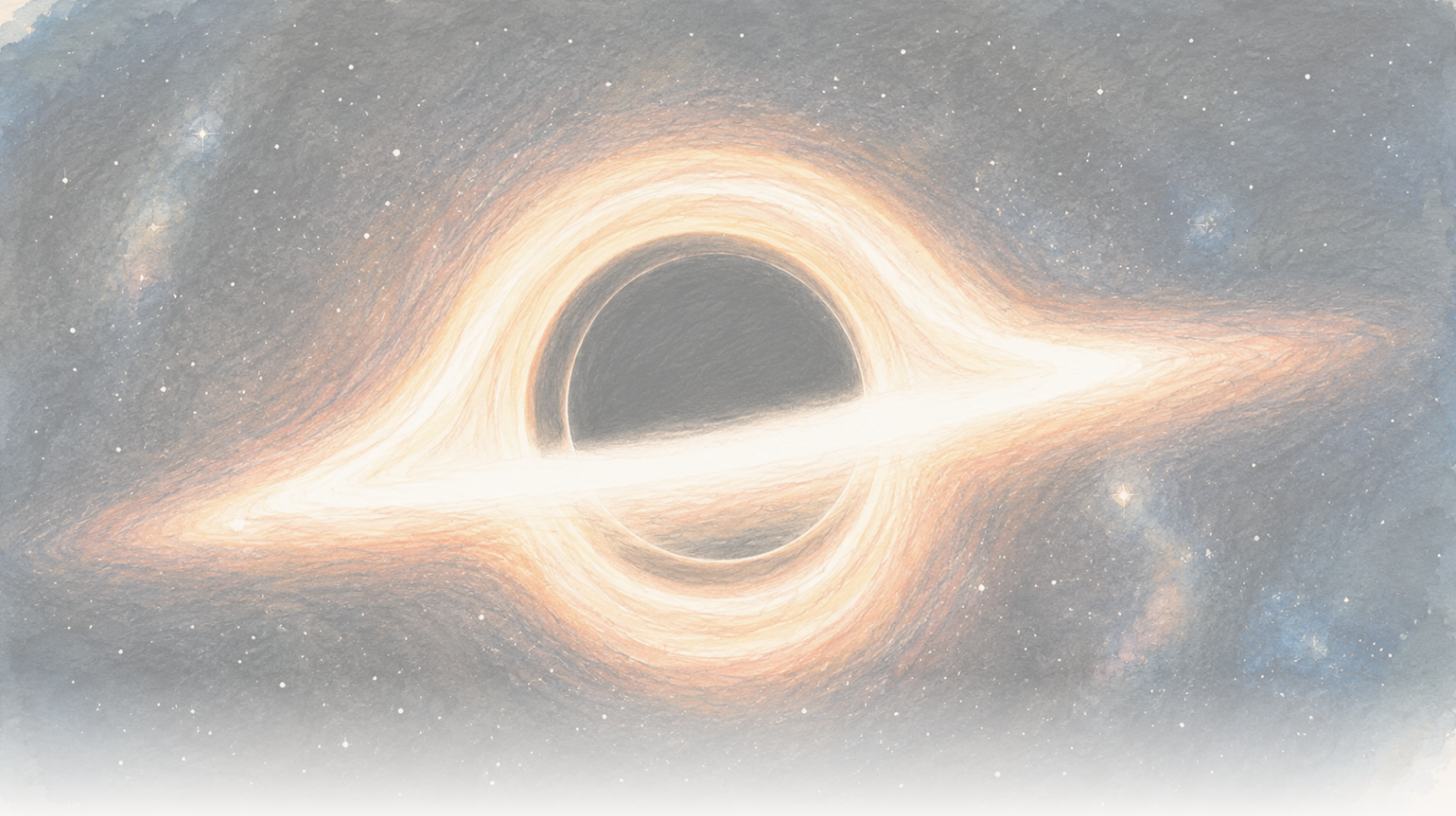




## The CLEAN PAPER

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 ۱۹۷۰ می‌دانیم سیاه‌چاله‌ها قوانینی دارند که ترمودینامیک را بازتاب می‌دهند، اما تمیزترین نسخه فقط برای سیاه‌چاله‌های آرام در تعادل کاربرد داشت. مقاله‌ای تازه در *Letters Review Physical* قانون اول و دوم را با استفاده از «افق‌های دینامیکی» محلی به سیاه‌چاله‌هایی گسترش می‌دهد که سریع تغییر می‌کنند — ماده می‌بلعند، ادغام می‌شوند یا تابش می‌کنند. این چارچوب اجازه می‌دهد حتی به سیاه‌چاله‌ها به شدت در حال تحول دما و آنترופی نسبت داد. نتیجه‌ای ریاضی در نسبیت عام کلاسیک است، نه گرانش کوانتومی تازه، نه مشاهده و نه حل مسئله 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 چاله‌ها «قوانینی» شبیه ترمودینامیک دارند. نسخه مرتب آن فقط وقتی کار می‌کرد که هیچ اتفاقی نمی‌افتاد

یکی از عجیب‌ترین واقعیت‌های فیزیک این است که سیاه چاله‌ها مانند اجسام گرم رفتار می‌کنند. در اوایل دهه 1970، Bekenstein و Hawking متوجه شدند معادلات حاکم بر سیاه چاله‌ها، جمله به جمله، با قوانین ترمودینامیک هم‌راستا هستند: سیاه چاله آنتروپی‌ای متناسب با مساحت افق خود و دمایی متناسب با گرانش سطحی‌اش دارد. Hawking سپس نشان داد این دما در عمیق‌ترین معنا واقعی است — سیاه چاله واقعاً، هرچند بسیار کم‌نور، تابش گرمایی گسیل می‌کند.

### تابش هاوکینگ چیست؟

در Stephen Hawking باشد. دما بدون و سیاه کاملاً باید بنابراین نمی‌گریزد، سیاه چاله از چیز هیچ کلاسیک فیزیک در وضعیتی بسیار گرمایی تابش سیاه چاله می‌کند: تغییر تصویر این کنیم وارد افق نزدیک را کوانتومی نظریه وقتی داد نشان 1974 حالی در است، گرمایی هاوکینگ دمای در طیف می‌شود. «تبخیر» یا می‌دهد دست از جرم به‌آرامی نتیجه در و می‌کند منتشر واقعی استنتاج که — راجع شهودی تصویر یک در می‌دهد. تغییر می‌رسد بی‌نهایت به که را تابشی خمیده فضا زمان در انتشار که و می‌گریزد تابش به صورت اعضا از یکی که می‌سازند جفت‌هایی افق بیرون درست کوانتومی نوسان‌های — نیست Hawking می‌کند. سقوط دیگری ویژگی کلیدی این است که این دما با جرم سیاه چاله نسبت وارون دارد: هرچه سیاه چاله کوچک‌تر باشد، داغ‌تر است. برای هر سیاه چاله‌ای که تلسکوپ بتواند ببیند، دما فوق‌العاده پایین است — بسیار سردتر از فضای اطراف — بنابراین در عمل این درخشش ناچیز است و هرگز مستقیماً اندازه‌گیری نشده. اهمیت آن مفهومی است: تابش هاوکینگ چیزی است که شباه میان مکانیک سیاه چاله و ترمودینامیک را به واقعیت ترمودینامیکی تبدیل می‌کند. چون سیاه چاله واقعاً دما دارد، «دما» و «آنتروپی» در این قوانین کمیت‌های واقعی ترمودینامیکی‌اند، نه تصادفی صوری. (این زمینه مقاله حاضر است، نه یکی از نتایج آن.)

این تناظر بر نتیجه‌ای به نام قانون اول مکانیک سیاه چاله (Carter (Bardeen و Hawking، 1973) تکیه دارد. به زبان ساده می‌گوید: اگر سیاه چاله‌ای 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 جمله‌ای مربوط به چرخش. نسخه سیاه چاله‌ای 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 نشسته‌اند و فقط بی‌نهایت اندکی متفاوت‌اند مقایسه می‌کند. در واقع هیچ فرایندی را توصیف نمی‌کند — سیاه چاله‌ای که ستاره‌ای را می‌بلعد، دو سیاه چاله که ادغام می‌شوند، یا سیاه چاله تازه زاده‌ای که پس از تولدی خشن زنگ‌وار فروکش می‌کند. این‌ها دقیقاً موقعیت‌هایی‌اند که بیش از همه می‌خواهیم بفهمیم و درست برعکس «آرام نشستن» هستند. قانون مرتب دقیقاً وقتی سیاه چاله جالب می‌شود ساکت می‌ماند.

## چرا راه حل بدیهی جواب نمی‌دهد؟

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 می‌کنند — افق رویداد، مرز واقعی بازگشت ناپذیری — ویژگی ظریف و ناخوشایندی دارد: با کل آینده جهان تعریف می‌شود. 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 بی‌اهمیت نیست. افق رویداد می‌تواند در ناحیه‌ای کاملاً خالی و تخت از فضا پیش از رسیدن ماده‌ای که قرار است آن را تغذیه کند شروع به رشد کند، فقط چون آن ماده در آینده قطعاً خواهد رسید. مساحت آن می‌تواند جایی افزایش یابد که در همان

محلی، 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 می‌گریزد 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 می‌گریزند، 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، از Shu، Jonathan و Paraizo Daniel Ashtekar، Abhay، نتیجه خود را روی مفهوم دیگری از افق می‌سازد — افقی شبه‌موضعی که فقط با هندسه همسایگی خود تعریف می‌شود و هیچ ارجاعی به آینده بی‌نهایت ندارد. این «قطعه‌های افق دینامیکی» همان سطوحی هستند که نسبت‌دانان عددی از پیش در شبیه‌سازی ادغام برای پیدا کردن سیاه‌چاله‌ها به کار می‌برند، دقیقاً چون محلی و صادق‌اند: مساحتشان فقط جایی رشد می‌کند که انرژی واقعاً از آن‌ها عبور 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 به سادگی 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 تعادل (یک سیاه‌چاله کر) فقط با دو عدد مشخص می‌شود: اندازه و چرخش. بنابراین نویسندگان نگاهی می‌سازند که هر افق به شدت در حال تحول و دور از تعادل را می‌گیرد و در هر لحظه دو عدد سیاه‌چاله تعادلی‌ای را می‌خواند که در همان لحظه بیشترین شباهت را به

آن دارد. با این نگاشت، حتی به سیاه‌چاله‌ای که به شدت در حال تغییر است می‌توان دما و چرخش وابسته به زمان نسبت داد.

با این اجزا — انرژی تعریف‌شده محلی که از افق عبور می‌کند و کمیت‌های شدتی لحظه‌ای — آن‌ها قانون اول را به سیاه‌چاله‌هایی با هر میزان فاصله از تعادل تعمیم می‌دهند. مهم‌تر این که قانون تازه تغییرهای متناهی ناشی از فرایندهای فیزیکی واقعی را توصیف می‌کند (عبور ماده و امواج گرانشی از افق)، نه گام‌های بی‌نهایت کوچک میان دو حالت پخش‌زده. آن را با قانون دوم متناظری همراه می‌کنند که حالا گزاره‌ای کمی دارد: مساحت افق به مقداری افزایش می‌یابد که مستقیماً با انرژی واردشده مرتبط است. قانون اول و دوم در کنار هم به نتیجه‌ای تمیز اشاره می‌کنند — حتی برای سیاه‌چاله‌ای در میانه خشن‌ترین رویداد قابل تصور، سنجۀ درست آنتروپی همچنان مساحت افق آن است.

## این پژوهش چه چیزی را ثابت نمی‌کند؟

- گرایش کوانتومی را حل نمی‌کند. این نتیجه‌ای در نسبیت عام کلاسیک است و از شناسایی استاندارد مساحت افق با آنتروپی استفاده می‌کند. آن آنتروپی را از چیزی بنیادی‌تر استخراج نمی‌کند.
- 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. «دمای» سیاه‌چاله در حال ادغام در این جا کمی دقیقاً تعریف‌شده در معادلات است، نه چیزی که بتوان با دماسنج خواند.
- **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 چیزی که هست، قوی‌اند: یک قطعه دقیق و از نظر داخلی سازگار از فیزیک ریاضی، از گروهی برجسته در این حوزه، که به‌عنوان 'Suggestion Editors در Letters Review Physical منتشر شده است (مقاله همراه استنتاج‌های طولانی‌تر را کار می‌کند).

احتیاط‌های صادقانه درباره نوع نتیجه‌اند، نه کیفیت آن:

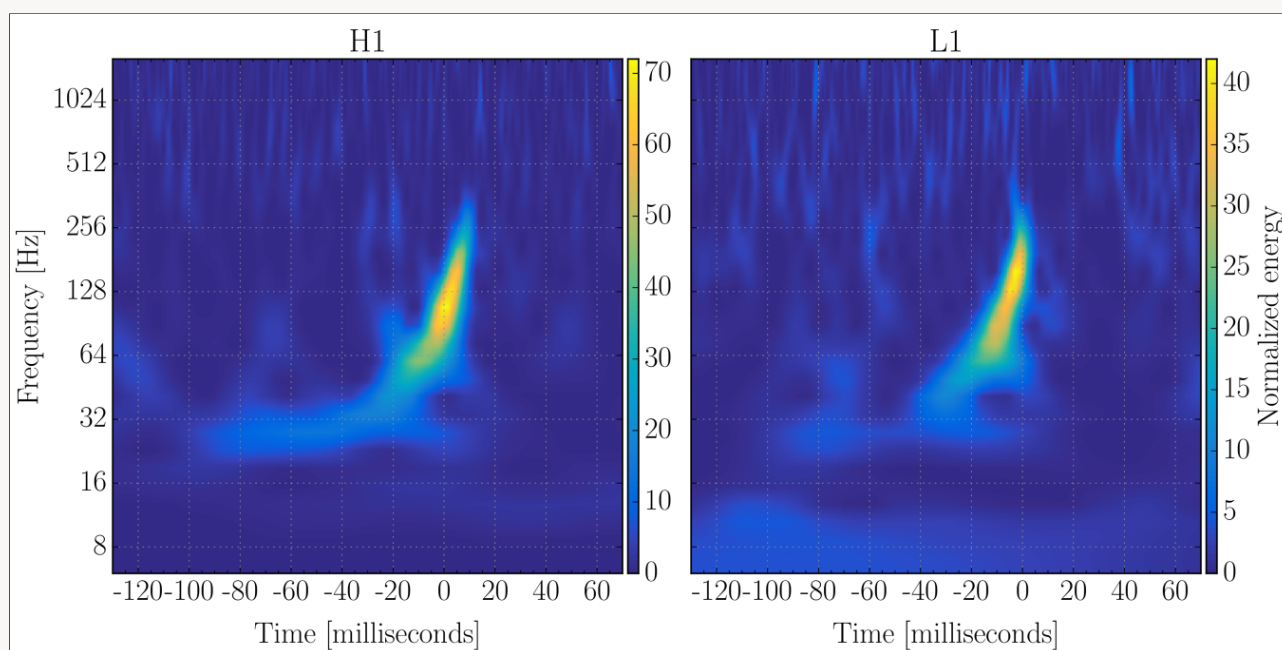
- کار بر فرض متعارف استوار است که مساحت افق همان آنتروپی است (مساحت تقسیم بر چهار برابر ثابت نیوتن و ثابت پلانک، با واحدهای مناسب). اگر روزی نظریه کامل گرایش کوانتومی این شناسایی را اصلاح کند، تفسیر نیز همراه آن تغییر خواهد کرد.
- محاسبات اصلی برای رایج‌ترین حالت انجام شده‌اند (افق‌های دینامیکی فضاگونه و تقارن محوری)؛ نویسندگان استدلال می‌کنند محدودیت‌ها بنیادی نیستند، اما گزاره کاملاً عمومی به نتایج موجود در کارهای دیگر تکیه دارد.
- «آنتروپی برابر مساحت افق است، حتی خارج از تعادل» شناسایی قانع‌کننده‌ای است که قوانین تازه آن را طبیعی می‌کنند — نه قضیه‌ای که از آمار میکروسکوپی اثبات شده باشد.

بنابراین: تعمیمی دقیق از چارچوبی پنجاه‌ساله، 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 امروز واقعاً مطالعه می‌کنیم — همان‌هایی که LIGO و Virgo ادغامشان را می‌شنوند — مهم‌ترین لحظاتی هستند که بسیار دور از تعادل می‌گذرانند. کمیت‌های این مقاله از همان افق‌های محلی ساخته شده‌اند که شبیه‌سازی‌ها از پیش دنبال می‌کنند، پس راهی اصولی برای صحبت دربارهٔ آنتروپی و دمای سیاه‌چاله در جریان ادغام یا رمبش می‌دهد، نه فقط پیش و پس از آن.



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 لحظهٔ ادغام رو به بالا می‌رود. این نمونه‌ای واقعی از سامانهٔ سیاه‌چاله‌ای بسیار دور از تعادل است؛ زمینه‌ای برای چارچوب ترمودینامیکی تازه، نه شاهد رصدی برای آن.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 0.3

از نظر مفهومی، رفتار ترمودینامیکی سیاه‌چاله‌هایی که از معدود سرخ‌های عینی ما دربارهٔ گرانش کوانتومی است — جایی که گرانش، 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 قوانینی دارند که بازتاب ترمودینامیک‌اند، اما «قانون اول» تمیز سال 1973 فقط سیاه‌چاله‌های ساکن در تعادل را مقایسه می‌کرد و نمی‌توانست یک فرایند واقعی را توصیف کند. Paraizo Ashtekar و Shu قانون اول و دوم را به سیاه‌چاله‌هایی با هر میزان فاصله از تعادل — در حال ادغام، تغذیه یا فروکش — تعمیم می‌دهند، با استفاده از «افق‌های دینامیکی» تعریف شده به صورت محلی و نگاشتی که به سیاه‌چاله در حال تغییر دما و چرخش لحظه‌ای نسبت می‌دهد. حاصل این است که مساحت افق حتی هنگام رویدادهای

خشن همچنان سنجۀ مناسب آنتروپی باقی می‌ماند. این نتیجه‌ای دقیق در نسبیت عام کلاسیک است، نه گرایش کوانتومی، نه مشاهده، نه شمارش ریزحالت‌ها و نه حل 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 پایه‌ی افق‌های دینامیکی شبه‌موضعی. قانون اول متناهی و مبتنی بر فرایند و قانون دومی کمی تعریف می‌کند و شناسایی آنتروپی سیاه‌چاله 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: نظریه کوانتومی گرانش؛ منشأ میکروسکوپی یا «شمارش» آنتروپی سیاه‌چاله؛ حل پارادوکس اطلاعات؛ هیچ نتیجه رصدی یا آزمایشی؛ یا دمایی که بتوان فیزیکی اندازه‌گیری کرد.

محدودیت‌های اصلی: سراسر در نسبیت عام کلاسیک؛ نتایج اصلی برای حالت رایج فضاگونه و محورمتقارن اثبات شده و عمومیت با تکیه بر کار همراه استدلال می‌شود؛ شناسایی مساحت-آنتروپی فرض می‌شود، نه از مکانیک آماری اثبات.

یک خواننده 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 مشاهده تازه است، نه گرایش کوانتومی و نه حل مسئله مشهور اطلاعات. موضع درست: گامی واقعی در فهم، برداشته‌شده با گچ، نه تلسکوپ.

## منابع

251405 ,136 Lett. Rev. Phys. Equilibrium, from Far Holes, Black of Thermodynamics Shu, & Paraizo Ashtekar, (2026)  
<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>