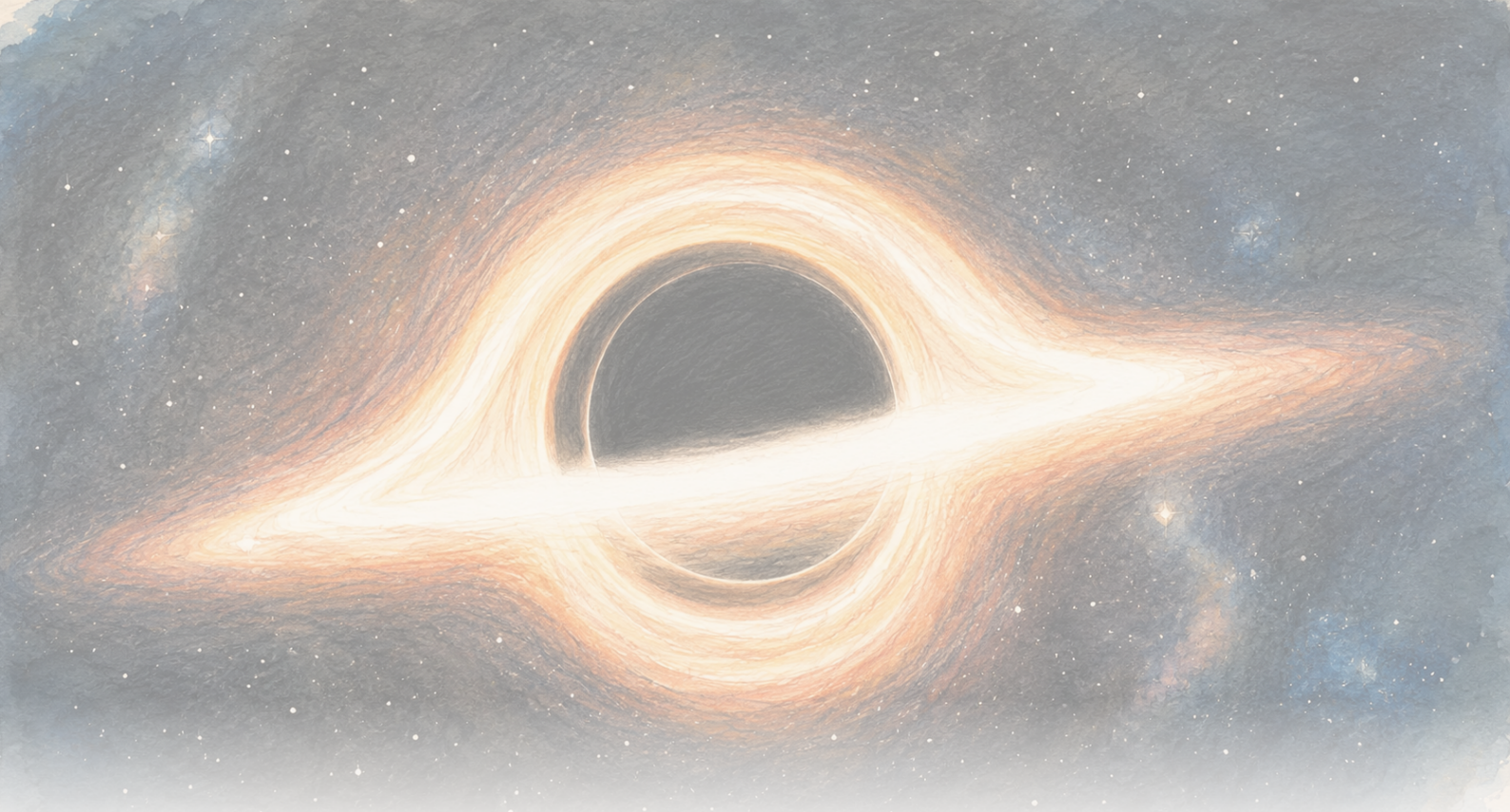




The CLEAN PAPER

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

Svarta hål följer termodynamiska "lagar" — ett nytt resultat utvidgar dem till svarta hål långt från jämvikt

Sedan 1970-talet har man vetat att svarta hål följer lagar som speglar termodynamiken, men den senaste versionen gällde bara svarta hål som låg stilla i jämvikt. En ny artikel i Physical Review Letters utvidgar den första och andra lagen till de delar av kvasilokala horisonter som uppfyller villkoren för dynamiska horisontsegment och kan befinna sig godtyckligt långt från jämvikt — under ackretion, kollaps och de flesta stadier av en sammanslagning mellan svarta hål. Simuleringar följer den kvasilokala horisonten under hela sammanslagningen, men lagarna omfattar ännu inte det korta intervallet kring sammansmältningen när den inte är ett dynamiskt horisontsegment. Det grundläggande ramverket hör hemma i allmän relativitetsteori, med en semiklassisk tillämpning på avdunstning; det är inte ny kvantgravitation, en observation eller en lösning på svarta håls informationsproblem.

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

Svarta hål har "lagar" som liknar termodynamik. Den prydliga versionen fungerade bara när ingenting hände.

Ett av fysikens märkligaste faktum är att svarta hål beter sig som varma föremål. I början av 1970-talet lade Bekenstein och Hawking märke till att ekvationerna för svarta hål motsvarar termodynamikens lagar, term för term: ett svart hål har en entropi som är proportionell mot horisontens area och en temperatur som är proportionell mot dess ytgravitation. Hawking visade sedan att temperaturen är verklig i djupaste mening — ett svart hål glöder faktiskt, om än ytterst svagt, med termisk strålning.

Vad är Hawkingstrålning?

Klassiskt kan ingenting ta sig ut ur ett svart hål, så det borde vara fullständigt svart och sakna temperatur. År 1974 visade Stephen Hawking att detta ändras när kvantteorin tas med nära horisonten: ett svart hål avger ett svagt termiskt sken och förlorar därför långsamt massa, eller "avdunstar". Spektrumet är termiskt vid Hawkingtemperaturen, medan färden genom krökt rumtid förändrar den strålning som når oändligheten. I en vanlig heuristisk bild — inte Hawkings faktiska härledning — skapar kvantfluktuationer strax utanför horisonten par där den ena parten flyr som strålning och den andra faller in.

Den centrala egenskapen är att temperaturen är *omvänt* proportionell mot det svarta hålets massa: ju mindre hålet är, desto varmare är det. För varje svart hål som ett teleskop skulle kunna se är temperaturen fantastiskt låg — långt lägre än den tomma rymden runt omkring — så i praktiken är skenet helt försumbart och har aldrig mätts direkt. Betydelsen är begreppslig: Hawkingstrålningen gör *analogin* mellan svartahålsmekanik och termodynamik till verklig termodynamik. Eftersom hålet faktiskt har en temperatur är "temperaturen" och "entropin" i dessa lagar verkliga termodynamiska storheter, inte en formell tillfällighet. (Detta är bakgrund till den aktuella artikeln, inte ett av dess resultat.)

Sambandet förankras av ett resultat som kallas **svartahålsmekanikens första lag** (Bardeen, Carter och Hawking, 1973). Med ord säger den: om man knuffar ett svart hål från ett stationärt tillstånd till ett närliggande stationärt tillstånd är förändringen i dess massa lika med temperaturen gånger förändringen i entropi, plus en term för rotationen. Det är det svarta hålets version av "tillförd värme är temperatur gånger entropiförändring".

Men det finns en hake i uttrycket *närliggande stationärt tillstånd*. Den rena lagen från 1973 jämför två svarta hål som vilar stilla i jämvikt och bara skiljer sig infinitesimalt. Den beskriver aldrig en faktisk **process** — ett svart hål som slukar en stjärna, två svarta hål som smälter samman eller ett nyfött hål som klingar av efter en våldsam födelse. Det är just de situationer vi helst vill förstå, och de är motsatsen till att "vila stilla". Den prydliga lagen tystnar precis när det svarta hålet blir intressant.

Varför den uppenbara lösningen inte fungerar

Man skulle kunna tro att lösningen är enkel: följ bara hur horisonten växer när materia faller in. Problemet är *vilken* horisont.

Den horisont som de flesta föreställer sig — **händelsehorisonten**, den verkliga punkten utan återvändo — har en subtil och besvärlig egenskap: den definieras av universums hela framtid. För att veta var händelsehorisonten finns *just nu* skulle man behöva veta allt som någonsin kommer att falla in i hålet, för all framtid. Detta är ingen teknikalitet. En händelsehorisont kan börja växa i ett helt tomt och platt område av rymden *innan* den materia som ska mata hålet har anlänt, enbart därför att materia är bestämd att komma senare. Dess area kan öka där ingenting alls händer lokalt.

Hur kan en horisont växa innan materia anländer?

Det vetenskapliga namnet på denna egenskap är **händelsehorisontens teleologiska natur**, även kallad dess **globala definition**. Här betyder "teleologisk" inte att horisonten har ett syfte, förutsäger framtiden eller skickar en påverkan bakåt i tiden. Det betyder att frågan om en händelse ligger innanför horisonten bara kan avgöras från rumtidens fullständiga framtida historia.

Den formella definitionen säger samma sak mer kompakt. Föreställ dig **framtida nolloändlighet** — uttalat "I-plus" och skrivet $\mathcal{I}^+$ — som den destination som nås av ljus som flyr för alltid mot en i övrigt tom, oändligt avlägsen framtid. Händelsehorisonten är gränsen mellan händelser från vilka en utåtriktad ljussignal till slut kan nå denna destination och händelser från vilka ingen sådan signal någonsin kan göra det. I den allmänna relativitetsteoris standardnotation är den gränsen för den kausala dåtiden till framtida nolloändlighet: $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. Eftersom ordet *någonsin* är inbyggt i definitionen kan ingen mätning som görs enbart här och nu exakt lokalisera händelsehorisonten.

Ett kollapsande sfäriskt skal gör märkligheten synlig. Innan skalet anländer kan området innanför vara tomt och lokalt platt. Skicka utåtriktade ljusstrålar från centrum vid successivt senare tidpunkter: de tidiga strålarna flyr, medan de senare möter det kollapsande skalet i en geometri som de inte kan ta sig ur. Händelsehorisonten är gränsen mellan dessa två utfall. Följd bakåt börjar gränsen i centrum och expanderar genom det ännu tomma, platta inre området innan skalet når dit. Den växande arean rapporterar inget lokalt flöde av materia där; den registrerar vilka flyktvägar som förblir öppna i den fullbordade rumtiden.

Ingenting i denna bild verkar bakåt i tiden. Om skalet avleddes och inget svart hål bildades skulle den fullbordade rumtiden vara annorlunda, och det tidigare området skulle inte ha ingått i en händelsehorisont. Lärdomen är inte att framtiden ändrar det förflutna, utan att en händelsehorisont är en **global kausal gräns**, inte en yta som en närbelägen observatör kan upptäcka i ett ögonblick. Det är just därför fysiker använder kvasilokala eller dynamiska horisonter när de behöver följa ett svart hål medan det förändras.

Det gör händelsehorisonten oanvändbar som en löpande redovisning av ett svart håls "tillstånd". Man kan inte ens lokalisera den i en datorsimulering förrän simuleringen är klar, och man kan definitivt inte använda den för att följa temperatur eller entropi ögonblick för ögonblick.

Greppet: en horisont som kan definieras lokalt

Den nya artikeln, av Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo och Jonathan Shu, bygger sitt resultat på ett annat horisontbegrepp — ett **kvasilokalt** sådant, definierat enbart av geometrin i sitt eget närområde, utan hänvisning till den oändliga framtiden. Dessa **kvasilokala horisonter** är de ytor som numeriska relativister redan använder för att lokalisera de ursprungliga svarta hålen, följa sammanslagningen och lokalisera det kvarvarande svarta hålet genom hela en simulering. De termodynamiska lagar som utvecklas här gäller för de delar av en kvasilokal horisont som uppfyller de ytterligare villkoren för ett **dynamiskt horisontsegment**. På varje sådant segment förändras arean som direkt svar på det lokala energiflödet, inte på händelser i en avlägsen framtid: den ökar vid positivt inflöde och minskar för en avdunstande tidslik horisont med negativt energiflöde.

Därutöver löser författarna problemets svårare halva. I vanlig termodynamik är ett system långt från jämvikt notoriskt svårfångat: det går inte att entydigt tilldela det en enda temperatur eller ett enda tryck, eftersom sådana storheter egentligen definieras först när systemet har stabiliserats. Svarta hål har samma problem — tills man, som författarna visar, utnyttjar en särskild egenskap hos den allmänna relativitetsteorin. Ett svart hål i jämvikt — ett Kerr-svart hål — bestäms av bara två tal: storleken och rotationen. Författarna bygger därför en avbildning som tar varje tillstånd längs ett dynamiskt horisontsegment och vid varje tvärsnitt av segmentet läser av de två tal som hör till det svarta hål i jämvikt som tillståndet tillfälligt liknar. Genom denna avbildning kan ett häftigt förändrande svart hål längs segmentet tilldelas en **tidsberoende temperatur och rotation**.

Med dessa delar — en lokalt definierad energi som flödar över horisonten och momentana intensiva storheter — utvidgar de den första lagen till svarta hål godtyckligt långt från jämvikt. Avgörande är att den nya lagen beskriver **ändliga förändringar orsakade av verkliga fysikaliska processer** (materia och gravitationsvågor som passerar horisonten), inte infinitesimala steg mellan två frusna tillstånd. De parar ihop den med en motsvarande andra lag vars utsaga nu är *kvantitativ*: förändringen av horisontens area är direkt knuten till det lokala energiflödet — tillväxt vid positivt inflöde eller minskning för en avdunstande tidslik horisont vid negativt flöde. Tillsammans pekar den första och andra lagen mot en enda tydlig slutsats — för varje fas som representeras av ett dynamiskt horisontsegment, hur våldsam den än är, är horisontens area fortfarande rätt mått på entropi.

Vad detta *inte* bevisar

- Det löser **inte** kvantgravitationen. Det grundläggande ramverket är formulerat inom allmän relativitetsteori; tillämpningen på svarta håls avdunstning använder den semiklassiska approximationen, där kvantfält för materia verkar på en klassisk rumtid. Det förutsätter fortfarande den vedertagna identifieringen av horisontens area med entropi, i stället för att härleda entropin ur något mer fundamentalt.
- Det räknar **inte** mikrotillstånd och förklarar inte *vad* ett svart håls entropi består av. Det utvidgar bokföringen för svartahålstermodynamik; det öppnar inte lådan och visar de mikroskopiska frihetsgraderna.
- Det löser **inte** informationsparadoxen för svarta hål. Den frågan hör hemma i kvantteorin; ar-

tikeln berör den inte.

- Det är **inte** en observation eller en mätning. Inget teleskop, inga data och ingen gravitationsvågssignal är inblandade — detta är matematik. Den ”temperatur” som tilldelas en dynamisk horisont medan ett svart hål utvecklas är en exakt definierad storhet i ekvationerna, inte något som kan avläsas med en termometer.
- Det ger **ännu inte** en sammanhängande termodynamisk beskrivning av hela sammansmältningen mellan två svarta hål. Numeriska simuleringar följer den kvasilokala horisonten genom hela utvecklingen — från de ursprungliga svarta hålen via sammanslagningen till det kvarvarande svarta hålet — men under ett kort intervall mycket nära sammanslagningen uppfyller denna horisont inte villkoren för ett dynamiskt horisontsegment. Enligt följeartikeln pågår arbetet fortfarande med en termodynamisk redogörelse för detta intervall.
- Det kullkastar **inte** Bekenstein och Hawking. Det *utvidgar* deras bild till den dynamiska regim där den ursprungliga lagen, som bara gällde jämvikt, inte hade något att säga.

Hur starka är beläggen?

Starka, för vad de avser: ett noggrant och internt konsekvent arbete i matematisk fysik från en ledande grupp på området, publicerat som *Editors' Suggestion* i Physical Review Letters. En sakkunniggranskad följeartikel innehåller de längre härledningarna och behandlar fall som av utrymmesskäl komprimerats bort ur den korta artikeln.

De ärliga förbehållen gäller *typen* av resultat, inte kvaliteten:

- Det bygger på standardantagandet att horisontarea *är* entropi — area dividerad med fyra gånger Newtons konstant och Plancks konstant. Om en fullständig kvantgravitationsteori en dag reviderar identifieringen följer tolkningen med.
- För korthetens och enkelhetens skull presenterar den korta artikeln huvudhärledningen med axialsymmetriska, rumslika dynamiska horisonter. Den sakkunniggranskade följeartikeln analyserar uttryckligen tidslika dynamiska horisonter och konstruerar rörelsemängdsmoment utan något rotationellt Killingfält. För avdunstande tidslika horisonter är dock den explicita behandlingen av återverkan begränsad till sfärisk symmetri.
- ”Entropi är lika med horisontarea även utanför jämvikt” är en övertygande *identifiering* som görs naturlig av de nya första och andra lagarna — inte ett teorem härlett ur mikroskopisk statistik.

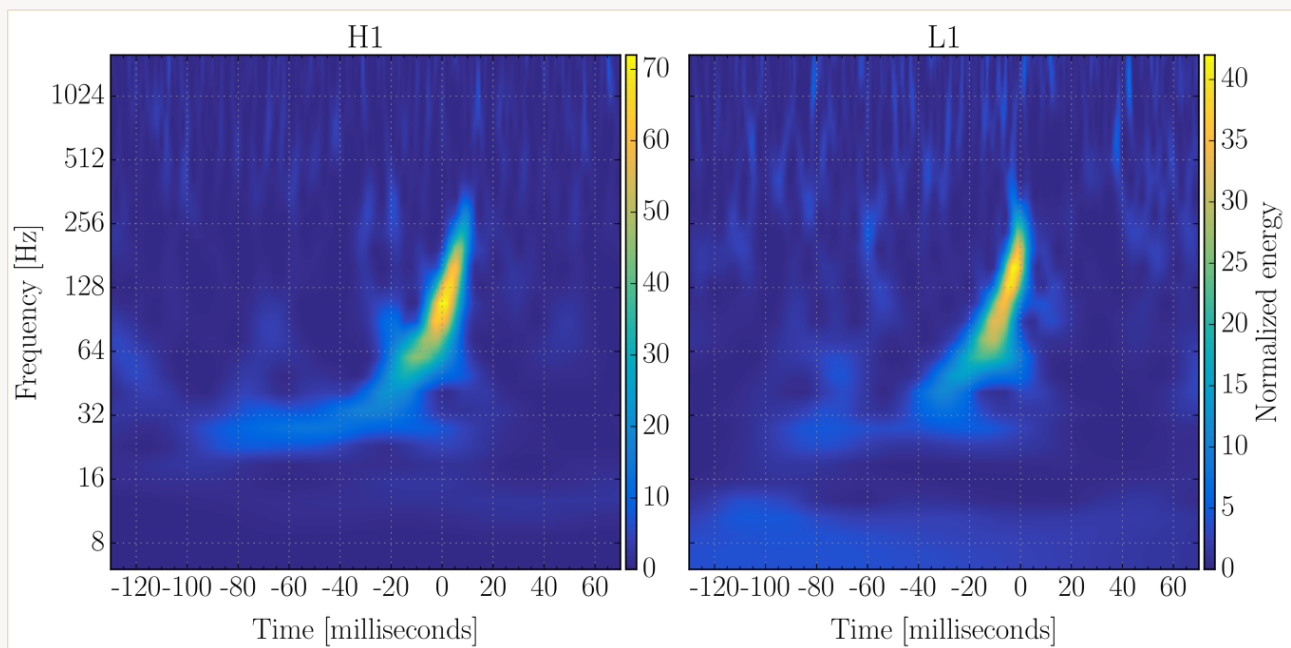
Alltså: en rigorös utvidgning av ett femtio år gammalt ramverk, inte en experimentell upptäckt och inte en ny naturlag som väntar på att testas.

Varför det spelar roll

Av två skäl, ett praktiskt och ett begreppsligt.

Praktiskt sett befinner sig de svarta hål vi faktiskt studerar i dag — de som LIGO och Virgo hör smälta

samman — långt från jämvikt under sina viktigaste ögonblick. Simuleringar följer den kvasilokala horisonten från de ursprungliga svarta hålen via sammanslagningen till det kvarvarande svarta hålet. Storheterna i artikeln gäller för de delar av horisonten som uppfyller villkoren för dynamiska horisontsegment, vilket ger ett principiellt sätt att tala om ett svart håls entropi och temperatur genom de flesta stadier av en sammanslagnings utveckling och under kollaps, inte bara sedan allt har stabiliserats. Under det korta intervallet alldeles kring sammansmältningen fortsätter den kvasilokala horisonten att följas, men ligger utanför den nuvarande termodynamiska beskrivningen.



GW150914, den första direkt detekterade gravitationsvågssignalen, kom från två svarta hål som smälte samman. Dessa tids-frekvenskartor visar signalen i LIGO Hanford till vänster och LIGO Livingston till höger: i båda detektorerna sveper det ljusa spåret uppåt när signalens frekvens stiger mot sammanslagningen. Detta är ett verkligt exempel på ett svartahålssystem långt från jämvikt; det ger bakgrund till det nya termodynamiska ramverket men är inte observationsbelägg för det.

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

Begreppsligt är svarta håls termodynamiska beteende en av de få konkreta ledtrådar vi har till kvantgravitation — det är där gravitation, kvantteori och termodynamik synligt möts. Genom att precisera exakt vad ”entropi” och ”temperatur” betyder för ett svart hål som förändras våldsamt skärps det mål som varje framtida kvantteori måste träffa. Arbetet besvarar inte den djupa frågan om vad ett svart håls entropi egentligen är. Det formulerar frågan mer exakt — vilket i detta hörn av fysiken är större delen av arbetet.

Kort sammanfattning

Svarta hål följer lagar som speglar termodynamiken, men den eleganta ‘första lagen’ från 1973 jämförde bara svarta hål som låg stilla i jämvikt och kunde inte beskriva en verklig process. Ashtekar, Paraizo och Shu utvidgar både den första och den andra lagen till svarta hål godtyckligt långt från

jämvikt — när de tillförs materia, kollapsar, klingar av eller genomgår de flesta stadier av en sammanslagning — genom att använda kvasilokala horisonter, tillämpa de termodynamiska lagarna på deras dynamiska horisontsegment och bygga en avbildning som tilldelar varje tillstånd längs dessa segment en momentan temperatur och rotation. Slutsatsen är att horisontens area förblir rätt mått på entropin för varje fas som representeras av ett dynamiskt horisontsegment. Det korta intervallet mycket nära sammansmältningen omfattas ännu inte av denna termodynamiska beskrivning, även om simuleringar fortsätter att följa den kvasilokala horisonten. Det grundläggande ramverket hör hemma i allmän relativitetsteori, med en semiklassisk tillämpning på avdunstning; det är inte kvantgravitation, en observation, en räkning av mikrotillstånd eller en lösning på informationsparadoxen.

Rakt på sak

Vad artikeln visar: En matematiskt konsekvent utvidgning av svartahålsmekanikens första och andra lagar till fullt dynamiska svarta hål långt från jämvikt, byggd på kvasilokala horisonter och de delar av dem som uppfyller villkoren för dynamiska horisontsegment. Den definierar en ändlig, processbaserad första lag och en kvantitativ andra lag och gör det naturligt att identifiera ett dynamiskt svart håls entropi med horisontens area.

Vad som är verkligt men bygger på tolkning: Identifieringen "entropi = horisontarea" utanför jämvikt. De nya lagarna gör den övertygande, men den ärver det klassiska standardantagandet om area och entropi snarare än att härleda det.

Vad den inte visar: En kvantteori för gravitation; ett mikroskopiskt ursprung eller en "räkning" av svartahålsentropi; en lösning på informationsparadoxen; något observations- eller experimentresultat; en temperatur som fysiskt kan mätas.

Viktigaste begränsningarna: Den grundläggande härledningen görs inom allmän relativitetsteori, medan tillämpningen på tidslik avdunstning använder den semiklassiska approximationen; det korta intervallet mycket nära en binär sammansmältning representeras inte av något dynamiskt horisontsegment, och dess termodynamiska beskrivning är fortfarande under utveckling, även om numeriska simuleringar fortsätter att följa den kvasilokala horisonten; den explicita behandlingen av återverkan för avdunstande tidslika horisonter är begränsad till sfärisk symmetri; identifieringen mellan area och entropi antas och bevisas inte utifrån statistisk mekanik.

Hur stor tillit bör en allmän läsare ha? Hög tillit till att detta är ett gediget och välrenommerat teoretiskt framsteg som faktiskt utvidgar svartahålstermodynamiken till den dynamiska regimen. Lika hög tillit till att det *inte* är ett påstående om nya observationer, inte kvantgravitation och inte en lösning på den berömda informationsgåtan. Rätt hållning: ett verkligt steg i förståelsen, taget med krita och inte med teleskop.

Uppdateringar efter publicering

- Rättelse · 2026-08-27

Efter återkoppling från den korresponderande författaren Abhay Ashtekar rättade vi två formuleringar där tidslika och icke-axialsymmetriska fall hade beskrivits som endast underbyggda med argument, snarare än uttryckligen behandlade i den sakkunniggranskade följeartikeln. Under granskningen förtydligade vi också att ramverket ännu inte omfattar det korta intervallet mycket nära en binär sammansmältning, då den kvasilokala horisonten inte uppfyller villkoren för ett dynamiskt horisontsegment.

• **Rättelse · 2026-08-28**

Efter ytterligare ett förtydligande från korresponderande författaren Abhay Ashtekar har vi skilt de kvasilokala horisonter, som numeriska simuleringar följer från de ursprungliga svarta hålen via sammanslagningen till det kvarvarande svarta hålet, från de delar som uppfyller de ytterligare villkoren för dynamiska horisontsegment, där de termodynamiska lagarna gäller.

Källor

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

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

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

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