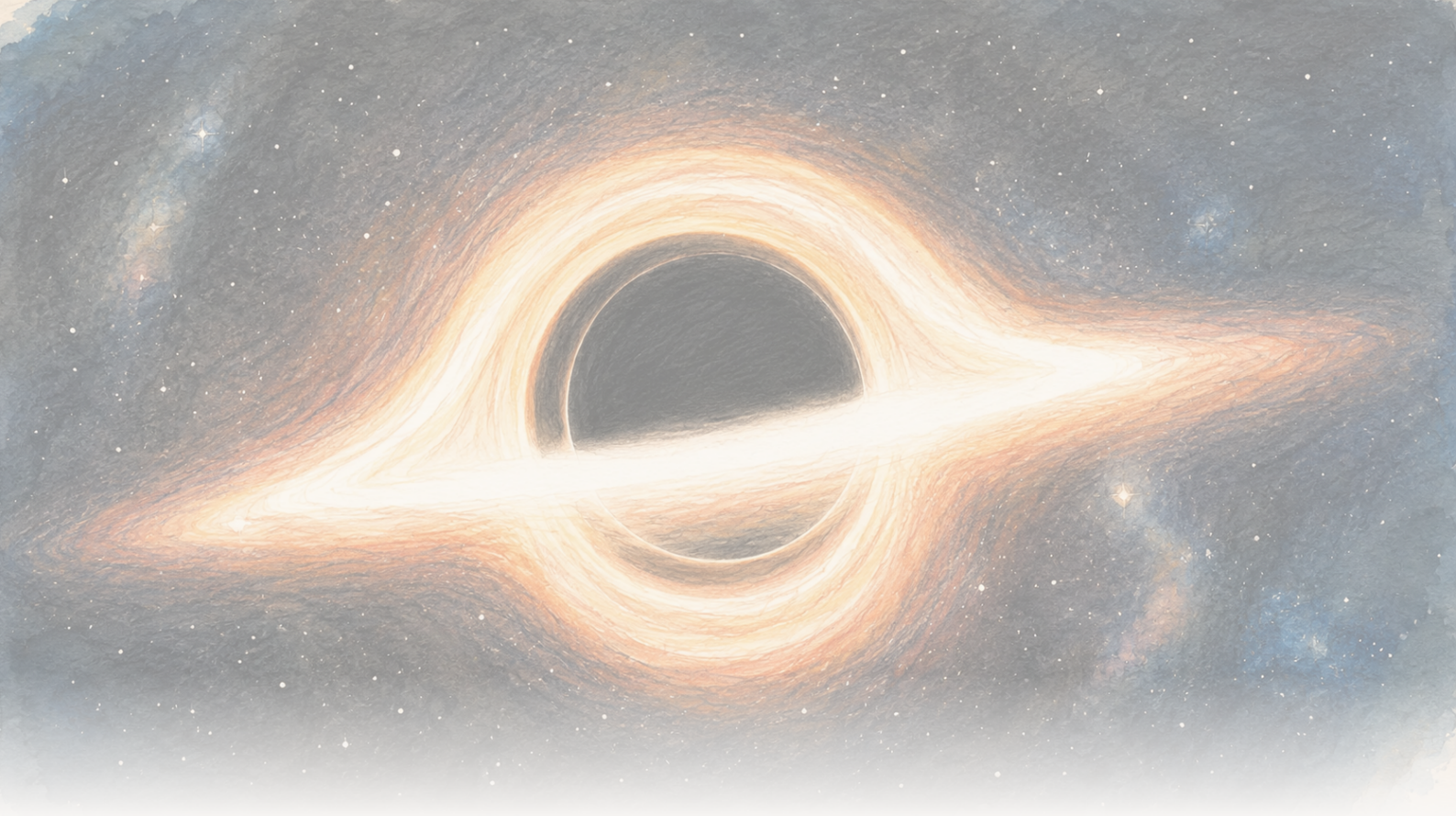




The CLEAN PAPER

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

Sorte hull følger termodynamiske «lover» — et nytt resultat utvider dem til sorte hull langt ute av likevekt

Siden 1970-årene har man visst at sorte hull følger lover som speiler termodynamikken, men den eleganteste versjonen gjaldt bare sorte hull som lå rolig i likevekt. En ny artikkel i Physical Review Letters utvider den første og andre loven til de delene av kvasilokale horisonter som kvalifiserer som dynamiske horisontsegmenter og kan være villkårlig langt fra likevekt — under akkresjon, kollaps og de fleste fasene av en sammensmeltning mellom sorte hull. Simuleringer følger den kvasilokale horisonten gjennom hele sammensmeltningen, men lovene dekker ennå ikke det korte intervallet rundt selve sammensmeltningen når den ikke er et dynamisk horisontsegment. Det grunnleggende rammeverket er i generell relativitet, med en semiklassisk anvendelse på fordampning; det er ikke ny kvantegravitasjon, en observasjon eller en løsning på informasjonsproblemet for sorte hull.

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

Sorte hull har «lover» som ligner termodynamikk. Den ryddige versjonen virket bare når ingenting skjedde

Et av de merkeligste faktumene i fysikken er at sorte hull oppfører seg som varme objekter. Tidlig på 1970-tallet oppdaget Bekenstein og Hawking at ligningene som styrer sorte hull, samsvarer ledd for ledd med termodynamikkens lover: Et sort hull har en entropi som er proporsjonal med arealet av horisonten, og en temperatur som er proporsjonal med overflategravitasjonen. Hawking viste deretter at temperaturen er virkelig i dypeste forstand — et sort hull gløder faktisk, svært svakt, med termisk stråling.

Hva er Hawking-stråling?

Klassisk sett slipper ingenting ut av et sort hull, så det burde være fullstendig svart og ikke ha noen temperatur. I 1974 viste Stephen Hawking at dette endrer seg når kvanteteorien tas med nær horisonten: Et sort hull sender ut en svak termisk glød og mister derfor langsomt masse, eller «fordamper». Spekteret er termisk ved Hawking-temperaturen, mens forplantningen gjennom krum romtid endrer strålingen som når uendelig langt bort. I et vanlig heuristisk bilde — ikke Hawkings faktiske utledning — skaper kvantefluktuasjoner rett utenfor horisonten par der den ene partneren slipper unna som stråling, mens den andre faller inn.

Det avgjørende er at denne temperaturen er *omvendt* proporsjonal med massen til det sorte hullet: Jo mindre hullet er, desto varmere er det. For ethvert sort hull et teleskop kan se, er temperaturen ufattelig lav — langt lavere enn temperaturen i det tomme rommet rundt — så gløden er i praksis fullstendig ubetydelig og har aldri blitt målt direkte. Betydningen er konseptuell: Hawking-stråling gjør *analogien* mellom mekanikken til sorte hull og termodynamikk til virkelig termodynamikk. Fordi hullet faktisk har en temperatur, er «temperatur» og «entropi» i disse lovene reelle termodynamiske størrelser, ikke en formell tilfeldighet. (Dette er bakgrunn for den aktuelle artikkelen, ikke et av resultatene.)

Denne korrespondansen forankres av et resultat som kalles **den første loven for mekanikken til sorte hull** (Bardeen, Carter og Hawking, 1973). Med ord sier den: Hvis du forstyrrer et sort hull fra én stabil tilstand til en nærliggende stabil tilstand, er endringen i massen lik temperaturen multiplisert med endringen i entropien, pluss et ledd for rotasjonen. Det er sorte hulls versjon av «tilført varme er lik temperatur ganger endring i entropi».

Men det skjuler seg en hake i uttrykket *nærliggende stabil tilstand*. Den rene loven fra 1973 sammenligner to sorte hull som ligger stille i likevekt og bare skiller seg uendelig lite fra hverandre. Den beskriver aldri en faktisk **prosess** — et sort hull som sluker en stjerne, to sorte hull som smelter sammen, eller et nyfødt hull som ringer ned etter en voldsom fødsel. Dette er nettopp situasjonene vi helst vil forstå, og de er det motsatte av «å ligge stille». Den ryddige loven blir taus akkurat når det sorte hullet blir interessant.

Hvorfor den åpenbare løsningen ikke virker

Man kunne tro at løsningen er enkel: Bare følg horisonten mens stoff faller inn. Problemet er *hvilken* horisont.

Horisonten de fleste ser for seg — **hendelseshorisonten**, det egentlige punktet uten retur — har en subtil og besværlig egenskap: Den defineres av hele universets fremtid. For å vite hvor hendelseshorisonten er *akkurat nå*, måtte du vite alt som noensinne vil falle inn i hullet, for all fremtid. Dette er ikke en teknisk detalj. En hendelseshorisont kan begynne å vokse i et helt tomt, flatt område av rommet *før* materien som senere skal mate hullet, har kommet frem, bare fordi denne materien er bestemt til å ankomme senere. Arealet kan øke på et sted der ingenting i det hele tatt skjer lokalt.

Hvordan kan en horisont vokse før materien kommer?

Det vitenskapelige navnet på dette problemet er hendelseshorisontens **teleologiske natur**, også kalt dens **globale definisjon**. «Teleologisk» betyr her ikke at horisonten har et formål, forutsier fremtiden eller sender en påvirkning bakover i tid. Det betyr at spørsmålet om en hendelse ligger innenfor horisonten, bare kan avgjøres ved å kjenne hele romtidens fremtidige historie.

Den formelle definisjonen sier det samme mer kompakt. Forestill deg **fremtidig null-uendelighet** — kalt «I-pluss» og skrevet $\mathcal{I}^+$ — som målet lys når når det slipper unna for alltid inn i en ellers tom, uendelig fjern fremtid. Hendelseshorisonten er grensen mellom hendelser der et utoverrettet lyssignal til slutt kan nå dette målet, og hendelser der ingen slike signaler noensinne kan gjøre det. I standardnotasjonen i generell relativitet er den grensen til den kausale fortiden til fremtidig null-uendelighet: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Fordi ordet *noensinne* er bygget inn i definisjonen, kan ingen måling som bare gjøres her og nå, lokalisere hendelseshorisonten nøyaktig.

Et kollapsende kuleformet skall gjør det underlige synlig. Før skallet kommer frem, kan området inne i det være tomt og lokalt flatt. Send utoverrettede lysstråler fra sentrum på stadig senere tidspunkter: De tidlige strålene slipper unna, mens de senere møter det kollapsende skallet i en geometri de ikke kan komme ut av. Hendelseshorisonten er grensen som skiller disse to utfallene. Følger man grensen bakover, begynner den i sentrum og utvider seg gjennom det fortsatt tomme, flate indre før skallet når frem. Det voksende arealet rapporterer ingen lokal strøm av materie der; det registrerer hvilke fluktruter som fortsatt er åpne i den fullførte romtiden.

Ingenting i dette bildet virker bakover i tid. Hvis skallet ble avledet og det ikke ble dannet noe sort hull, ville den fullførte romtiden vært annerledes, og det tidligere området ville ikke ha vært del av en hendelseshorisont. Lærdommen er ikke at fremtiden endrer fortiden, men at en hendelseshorisont er en **global kausal grense**, ikke en overflate en observatør i nærheten kan oppdage i ett øyeblikk. Det er nettopp derfor fysikere bruker kvasi-lokale eller dynamiske horisonter når de vil følge et sort hull mens det endrer seg.

Dette gjør hendelseshorisonten ubrukelig som en løpende beskrivelse av et sort hulls «tilstand». Den kan ikke engang lokaliseres i en datasimulering før simuleringen er ferdig, og kan slett ikke brukes

til å følge temperatur eller entropi øyeblikk for øyeblikk.

Grepet: en horisont som kan defineres lokalt

Den nye artikkelen av Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo og Jonathan Shu bygger resultatet på et annet horisontbegrep — et **kvasilokalt** begrep, definert utelukkende av geometrien i horisontens eget nærområde, uten henvisning til den uendelige fremtiden. Disse **kvasilokale horisontene** er overflatene numeriske relativister allerede bruker til å lokalisere de opprinnelige sorte hullene, følge sammensmeltningen og lokalisere restobjektet gjennom hele simuleringen. De termodynamiske lovene som utvikles her, gjelder for de delene av en kvasilokal horisont som oppfyller tilleggskravene til et **dynamisk horisontsegment**. På hvert slikt segment endrer arealet seg direkte som respons på den lokale energifluksen, ikke på hendelser i en fjern fremtid: Det øker ved positiv innstrømning og avtar for en fordampende tidslik horisont med negativ energifluks.

I tillegg løser forfatterne den vanskeligere halvdelen av problemet. I vanlig termodynamikk er et system langt fra likevekt notorisk vanskelig å beskrive: Man kan ikke rent tilordne det én temperatur eller ett trykk, fordi disse størrelsene først er veldefinerte når systemet har roet seg. Sorte hull har det samme problemet — helt til forfatterne viser at man kan bruke et særtrekk ved generell relativitet. Et sort hull i likevekt, et Kerr-sort hull, bestemmes av bare to tall: størrelse og spinn. Forfatterne bygger derfor en avbildning som tar hver tilstand langs et dynamisk horisontsegment og ved hvert tverrsnitt av segmentet leser av de to tallene for det likevektssorte hullet som tilstanden da ligner. Gjennom denne avbildningen kan et sort hull i voldsom endring tilordnes en **tidsavhengig temperatur og et tidsavhengig spinn** langs segmentet.

Med disse bestanddelene — lokalt definert energi som strømmer over horisonten, og øyeblikkelige intensive størrelser — utvider de den første loven til sorte hull vilkårlig langt fra likevekt. Det avgjørende er at den nye loven beskriver **endelige endringer forårsaket av reelle fysiske prosesser** (materie og gravitasjonsbølger som krysser horisonten), ikke infinitesimale trinn mellom to frosne tilstander. De kobler den sammen med en tilsvarende andre lov, som nå er formulert *kvantitativt*: Endringen i horisontarealet er direkte knyttet til den lokale energifluksen — vekst ved positiv innstrømning eller nedgang for en tidslik, fordampende horisont ved negativ fluks. Samlet peker den første og andre loven mot én klar konklusjon: For enhver fase som representeres av et dynamisk horisontsegment, uansett hvor voldsom den er, er horisontarealet fortsatt det riktige målet på entropi.

Hva dette ikke beviser

- Det løser **ikke** kvantegravitasjonen. Det grunnleggende rammeverket er formulert i generell relativitet; anvendelsen på fordampning av sorte hull bruker den semiklassiske tilnærmingen, der kvantefelt for materie virker på en klassisk romtid. Det forutsetter fortsatt den vanlige identifikasjonen av horisontareal med entropi, fremfor å utlede denne entropien fra noe mer funda-

mentalt.

- Det teller **ikke** mikrotilstander og forklarer ikke *hva* entropien til et sort hull består av. Det utvider bokføringen i termodynamikken for sorte hull; det åpner ikke boksen og avslører de mikroskopiske frihetsgradene.
- Det løser **ikke** informasjonsparadokset for sorte hull. Dette problemet hører hjemme i kvanteteorien; artikkelen berører det ikke.
- Det er **ikke** en observasjon eller måling. Ingen teleskoper, data eller gravitasjonsbølgesignaler er involvert — dette er matematikk. «Temperaturen» som tilordnes en dynamisk horisont mens et sort hull utvikler seg, er en presist definert størrelse i ligningene, ikke noe man kan lese av på et termometer.
- Det gir **ennå ikke** en sammenhengende termodynamisk beskrivelse av hele sammensmeltningen mellom to sorte hull. Numeriske simuleringer følger den kvasilokale horisonten gjennom hele utviklingen — fra de opprinnelige sorte hullene via sammensmeltningen til restobjektet — men i et kort intervall svært nær selve sammensmeltningen oppfyller denne horisonten ikke kravene til et dynamisk horisontsegment. Ifølge ledsagerartikkelen er en termodynamisk beskrivelse av dette intervallet fortsatt under arbeid.
- Det velter **ikke** Bekenstein og Hawking. Det *utvider* bildet deres til det dynamiske regimet der den opprinnelige loven, begrenset til likevekt, ikke hadde noe å si.

Hvor sterke er bevisene?

Sterkt, for den typen resultat dette er: et grundig og internt konsistent arbeid i matematisk fysikk fra en ledende gruppe på feltet, publisert som en *Editors' Suggestion* i Physical Review Letters. En fagfellevurdert ledsagerartikkel gir de lengre utledningene og behandler tilfeller som er utelatt fra den korte Letter-artikkelen.

De ærlige forbeholdene gjelder *typen*, ikke kvaliteten:

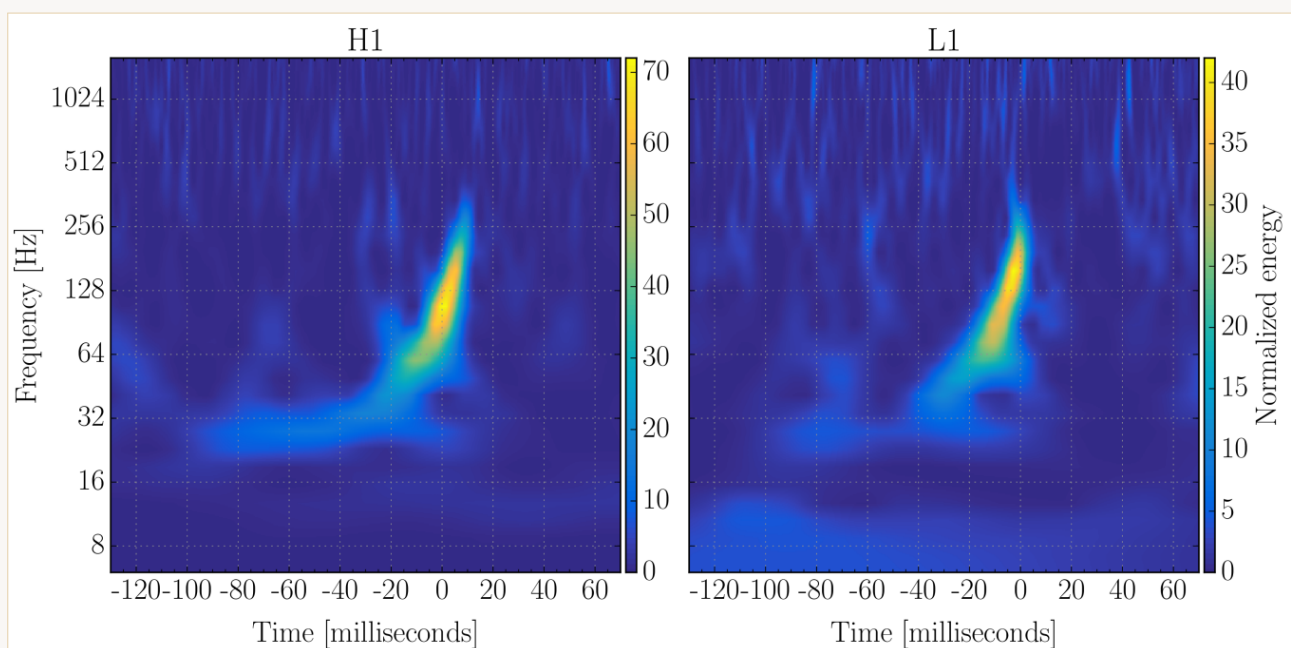
- Resultatet bygger på den vanlige antakelsen om at horisontareal *er* entropi — arealet delt på fire ganger Newtons konstant og Plancks konstant. Hvis denne identifikasjonen en dag revideres av en fullstendig teori for kvantegravitasjon, vil tolkningen endres med den.
- Av hensyn til korthet og enkelhet presenterer den korte Letter-artikkelen hovedutledningen med aksialsymmetriske, romlige dynamiske horisonter. Den fagfellevurderte ledsagerartikkelen analyserer eksplisitt tidslike dynamiske horisonter og konstruerer dreieimpuls uten et rotasjonelt Killing-felt. For fordampende tidslike horisonter er imidlertid den eksplisitte behandlingen av tilbakevirkningen begrenset til sfærisk symmetri.
- «Entropi er lik horisontareal, også utenfor likevekt» er en overbevisende *identifikasjon* som gjøres naturlig av de nye første og andre lovene — ikke et teorem utledet fra mikroskopisk statistikk.

Altså: en stringent utvidelse av et femti år gammelt rammeverk, ikke en eksperimentell oppdagelse og ikke en ny naturlov som venter på å bli testet.

Hvorfor det er viktig

To grunner, én praktisk og én konseptuell.

I praksis tilbringer de sorte hullene vi faktisk studerer i dag — dem LIGO og Virgo «hører» smelte sammen — sine viktigste øyeblikk langt fra likevekt. Simuleringer følger den kvasilokale horisonten fra de opprinnelige sorte hullene via sammensmeltningen til restobjektet. Størrelsene i denne artikkelen gjelder for de delene av horisonten som kvalifiserer som dynamiske horisontsegmenter, og gir dermed en prinsipielt begrunnet måte å snakke om entropien og temperaturen til et sort hull gjennom de fleste fasene av en sammensmeltning og under kollaps, ikke bare etter at alt har falt til ro. I det korte intervallet like rundt sammensmeltningen blir den kvasilokale horisonten fortsatt fulgt, men faller utenfor den nåværende termodynamiske beskrivelsen.



GW150914, det første gravitasjonsbølgesignalet som ble direkte oppdaget, kom fra to sorte hull som smeltet sammen. Disse tids-frekvenskartene viser signalet i LIGO Hanford til venstre og LIGO Livingston til høyre: I begge detektorene bøyer det lyse sporet oppover når signalets frekvens stiger mot sammensmeltningen. Dette er et virkelig eksempel på et system av sorte hull langt fra likevekt; det gir kontekst for det nye termodynamiske rammeverket, men er ikke observasjonsbevis for det.

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

Konseptuelt er den termodynamiske oppførselen til sorte hull ett av de få konkrete sporene vi har mot kvantegravitasjon — stedet der gravitasjon, kvanteteori og termodynamikk møtes synlig. Å presisere nøyaktig hva «entropi» og «temperatur» betyr for et sort hull som endrer seg voldsomt, skjerper målet enhver fremtidig kvanteteori må treffe. Det svarer ikke på det dype spørsmålet om hva entropien til et sort hull egentlig er. Det formulerer spørsmålet mer presist — noe som i denne delen av fysikken er det meste av arbeidet.

Kort oppsummert

Sorte hull følger lover som speiler termodynamikken, men den elegante «første loven» fra 1973 sammenlignet bare sorte hull som lå stille i likevekt, og kunne ikke beskrive en faktisk prosess. Ashtekar, Paraizo og Shu utvider både den første og den andre loven til sorte hull vilkårlig langt fra likevekt — under tilførsel av materie, kollaps, nedringing og de fleste fasene av en sammensmeltning — ved å bruke kvasilokale horisonter, anvende de termodynamiske lovene på deres dynamiske horisontsegmenter og bygge en avbildning som tilordner hver tilstand langs disse segmentene en øyeblikkelig temperatur og et øyeblikkelig spinn. Konklusjonen er at horisontarealet fortsatt er det riktige målet på entropi for enhver fase som representeres av et dynamisk horisontsegment. Det korte intervallet svært nær sammensmeltningen er ennå ikke dekket av denne termodynamiske beskrivelsen, selv om simuleringene fortsetter å følge den kvasilokale horisonten. Det grunnleggende rammeverket er i generell relativitet, med en semiklassisk anvendelse på fordampning; det er ikke kvantegravitasjon, en observasjon, telling av mikrotilstander eller en løsning på informasjonsparadokset.

Nøktern vurdering

Hva artikkelen viser: En matematisk konsistent utvidelse av den første og andre loven for mekanikken til sorte hull til fullt dynamiske sorte hull langt fra likevekt, bygget på kvasilokale horisonter og de delene av dem som oppfyller kravene til dynamiske horisontsegmenter. Den definerer en endelig, prosessbasert første lov og en kvantitativ andre lov og gjør det naturlig å identifisere entropien til et dynamisk sort hull med horisontarealet.

Hva som er reelt, men tolkende: Identifikasjonen «entropi = horisontareal» utenfor likevekt. De nye lovene gjør den overbevisende, men den arver den vanlige, klassiske antakelsen om areal og entropi i stedet for å utlede den.

Hva den ikke viser: En kvanteteori for gravitasjon; et mikroskopisk opphav eller en «telling» av entropien til sorte hull; en løsning på informasjonsparadokset; noe observasjons- eller forsøksresultat; en temperatur som fysisk kan måles.

Viktigste begrensninger: Den grunnleggende utledningen er i generell relativitet, mens anvendelsen på tidslig fordampning bruker den semiklassiske tilnærmingen; det korte intervallet svært nær en binær sammensmeltning representeres ikke av et dynamisk horisontsegment, og den termodynamiske beskrivelsen er fortsatt under arbeid, selv om numeriske simuleringer fortsetter å følge den kvasilokale horisonten; den eksplisitte behandlingen av tilbakevirkning for fordampende tidslige horisonter er begrenset til sfærisk symmetri; identifikasjonen mellom areal og entropi forutsettes og bevises ikke ut fra statistisk mekanikk.

Hvor stor tillit bør en vanlig leser ha? Høy tillit til at dette er et solid og anerkjent teoretisk fremskritt som virkelig utvider termodynamikken for sorte hull til det dynamiske regimet. Like høy tillit til at det *ikke* er en påstand om nye observasjoner, ikke kvantegravitasjon og ikke en løsning på det berømte informasjonsproblemet. Riktig holdning er: et reelt skritt i forståelsen, tatt med kritt og ikke med teleskop.

Oppdateringer etter publisering

- **Rettelse · 2026-08-27**

Etter tilbakemelding fra korresponderende forfatter Abhay Ashtekar rettet vi to formuleringer som hadde beskrevet tidslike og ikke-aksialsymmetriske tilfeller som bare argumentert for, fremfor eksplisitt behandlet i den fagfellelevurderte ledsagerartikkelen. Under gjennomgangen presiserte vi også at rammeverket ennå ikke dekker det korte intervallet svært nær en binær sammensmeltning, der den kvasilokale horisonten ikke oppfyller kravene til et dynamisk horisontsegment.

- **Rettelse · 2026-08-28**

Etter en ytterligere presisering fra korresponderende forfatter Abhay Ashtekar har vi skilt mellom kvasilokale horisonter, som numeriske simuleringer følger fra de opprinnelige sorte hullene via sammensmeltningen til restobjektet, og de delene som oppfyller tilleggskravene til dynamiske horisontsegmenter, der de termodynamiske lovene gjelder.

Kilder

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>