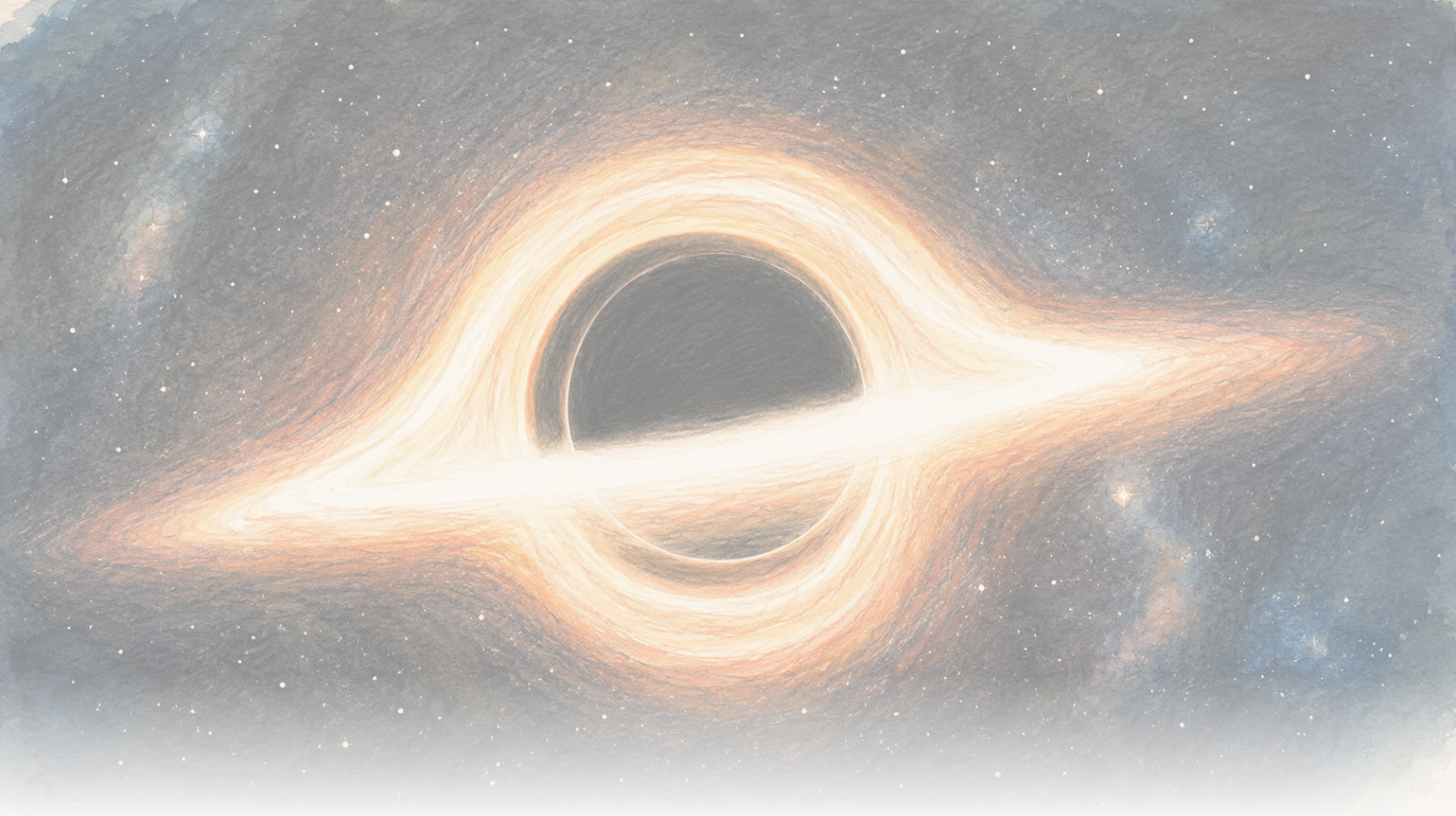




The CLEAN PAPER

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 reneste versjonen gjaldt bare sorte hull som satt rolig i likevekt. En ny artikkel i Physical Review Letters utvider den første og andre loven til sorte hull som endrer seg raskt — sluker materie, smelter sammen eller stråler — ved å bruke lokalt definerte «dynamiske horisonter». Det gjør at fysikere kan tilordne temperatur og entropi selv til et sort hull i voldsom utvikling. Dette er et matematisk resultat i klassisk generell relativitet, ikke ny kvantegravitasjon, ikke en observasjon og ikke 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 en annen type horisont — en **kvasi-lokal** horisont, definert bare av geometrien i sitt eget nærområde, uten henvisning til den uendelige fremtiden. Disse «dynamiske horisontsegmentene» er overflatene numeriske relativister allerede bruker til å finne sorte hull i sammensmeltningssimuleringer, nettopp fordi de er lokale og ærlige: Arealet vokser bare der energi faktisk krysser dem.

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 et kart som tar en hvilken som helst voldsomt utviklende horisont utenfor likevekt og leser av, i hvert øyeblikk, de to tallene for det likevektssorte hullet den da ligner. Gjennom dette kartet kan selv et raskt skiftende sort hull tilordnes en **tidsavhengig temperatur og et tidsavhengig spinn**.

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 virkelige fysiske prosesser** — materie og gravitasjonsbølger som krysser horisonten — ikke uendelig små trinn mellom to frosne tilstander. De kobler den til en tilsvarende andre lov som nå er *kvantitativ*: Horisontarealet vokser med en mengde som er direkte knyttet til energien som strømmet inn. Samlet peker første og andre lov mot én ren konklusjon: Selv for et sort hull midt i den mest voldsomme hendelsen man kan forestille seg, er horisontarealet fortsatt det riktige målet på entropi.

Hva dette ikke beviser

- Det løser **ikke** kvantegravitasjon. Dette er et resultat i *klassisk* generell relativitet, med den vanlige identifikasjonen av horisontareal som entropi. Det utleder ikke denne entropien fra noe mer fundamentalt.
- 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» til et sammensmeltende sort hull er her en presist definert størrelse i ligningene, ikke noe man kunne lese av på et termometer.

- 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?

Sterke, 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 ledsagerartikkel gjennomgår de lengre utledningene.

De ærlige forbeholdene gjelder *typen*, ikke kvaliteten:

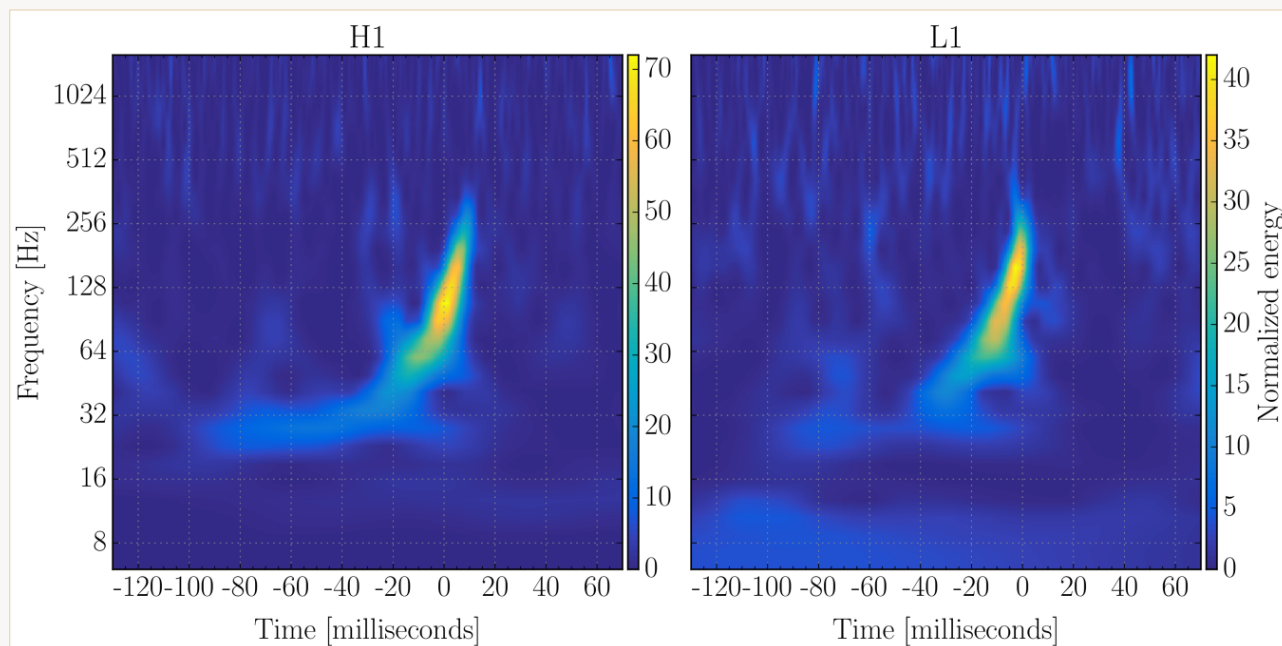
- Resultatet bygger på den vanlige antakelsen om at horisontareal *er* entropi — arealet delt på fire ganger Newtons konstant og Plancks konstant. Hvis denne identifikasjonen en dag revideres av en fullstendig teori for kvantegravitasjon, vil tolkningen endres med den.
- Hovedberegningene er utført for det vanligste tilfellet, romlige dynamiske horisonter med aksial-symmetri. Forfatterne argumenterer for at begrensningene ikke er grunnleggende, men den fullt generelle formuleringen støtter seg på resultater andre steder.
- «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.

Praktisk sett er de sorte hullene vi nå faktisk studerer — dem LIGO og Virgo hører smelte sammen — langt fra likevekt i sine viktigste øyeblikk. Størrelsene i denne artikkelen er bygget fra de samme lokalt definerte horisontene som simuleringer allerede følger. Dermed gir arbeidet en prinsipiell måte å snakke om entropien og temperaturen til et sort hull *under* en sammensmelting eller kollaps, ikke bare før og etter.



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 sammensmeltingen. 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 rene «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 første og andre lov til sorte hull vilkårlig langt fra likevekt — under sammensmelting, tilførsel av stoff og nedringing — ved å bruke lokalt definerte «dynamiske horisonter» og et kart som tilordner et skiftende sort hull en øyeblikkelig temperatur og et øyeblikkelig spinn. Konklusjonen er at horisontarealet fortsatt er det riktige målet på entropi under voldsomme hendelser. Dette er et stringent resultat i klassisk generell relativitet, ikke kvantegravitasjon, ikke en observasjon, ikke en telling av mikrotilstander og ikke 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 kvasi-lokale dynamiske horisonter. 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: Klassisk generell relativitet hele veien; hovedresultatene er bevist for det vanlige romlige, aksialsymmetriske tilfellet, mens allmennheten argumenteres for gjennom ledsagerarbeid; identifikasjonen mellom areal og entropi antas og bevises ikke 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.

Kilder

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

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