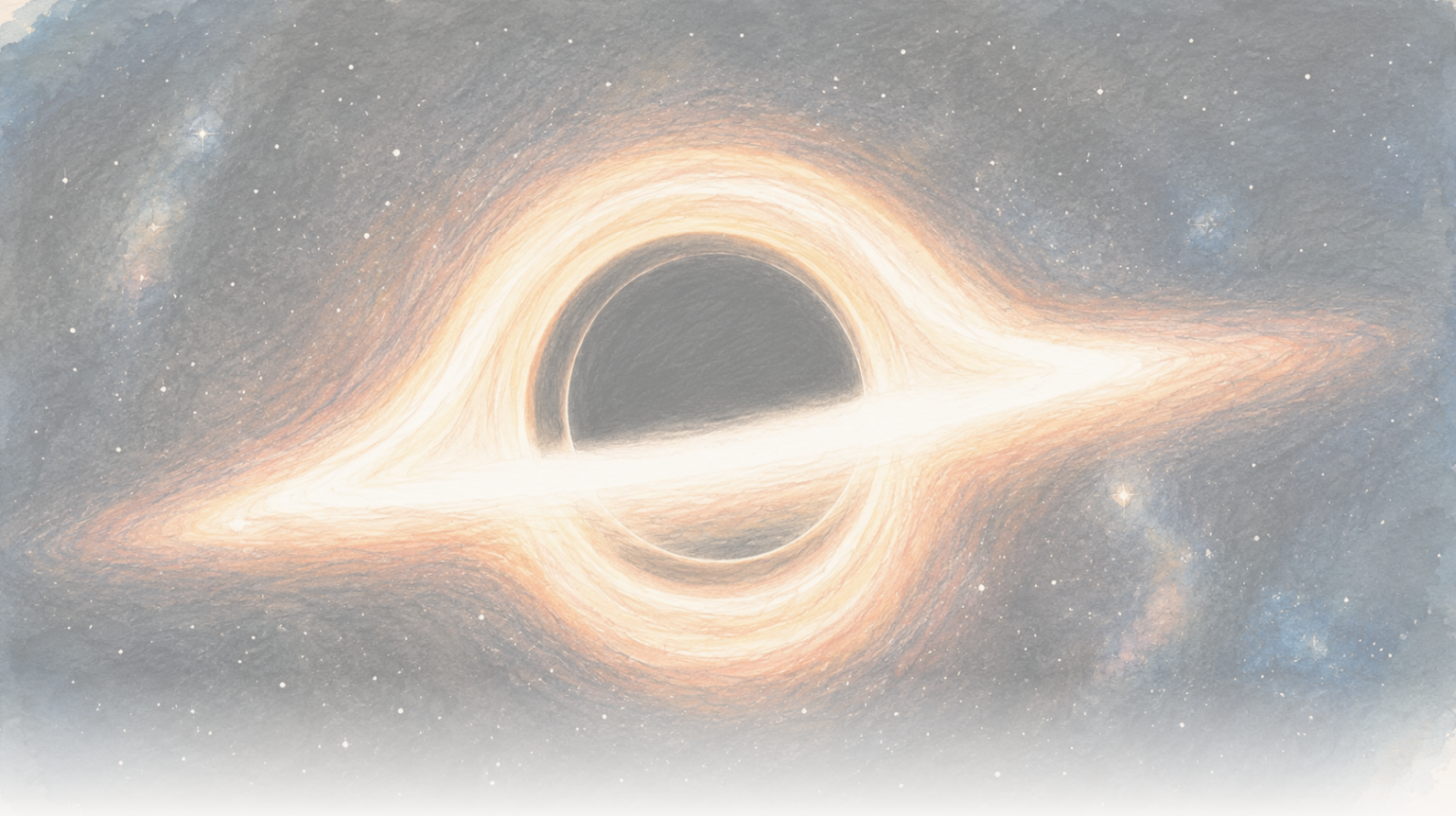




The CLEAN PAPER

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

Sorte huller følger termodynamiske »love« — et nyt resultat udvider dem til sorte huller voldsomt langt fra ligevægt

Siden 1970'erne har man vidst, at sorte huller følger love, der spejler termodynamikken, men den reneste version gjaldt kun sorte huller, der lå stille i ligevægt. En ny artikel i Physical Review Letters udvider den første og anden lov til sorte huller, der ændrer sig hurtigt — sluger stof, smelter sammen eller stråler — ved hjælp af lokalt definerede dynamiske horisonter. Det gør det muligt at tildele temperatur og entropi selv til et voldsomt udviklende sort hul. Det er et matematisk resultat i klassisk generel relativitet, ikke ny kvantegravitation, ikke en observation og ikke en løsning på sorte hullers 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

Sorte huller har »love«, der ligner termodynamikkens. Den pæne version virkede kun, når der ikke skete noget

En af fysikkens mærkeligste kendsgerninger er, at sorte huller opfører sig som varme objekter. I begyndelsen af 1970'erne opdagede Bekenstein og Hawking, at ligningerne, der styrer sorte huller, svarer led for led til termodynamikkens love: Et sort hul har en entropi, der er proportional med horisontens areal, og en temperatur, der er proportional med overfladetyngdekraften. Hawking viste derefter, at temperaturen er virkelig i den dybeste betydning — et sort hul gløder faktisk, meget svagt, med termisk stråling.

Hvad er Hawking-stråling?

Klassisk slipper intet ud af et sort hul, så det burde være fuldstændig sort og ikke have nogen temperatur. I 1974 viste Stephen Hawking, at dette ændrer sig, når kvanteteori medtages nær horisonten: Et sort hul udsender en svag termisk glød og mister derfor langsomt masse, eller »fordamper«. Spektret er termisk ved Hawking-temperaturen, mens udbredelsen gennem krum rumtid ændrer den stråling, der når uendeligt langt væk. I et almindeligt heuristisk billede — ikke Hawkings faktiske udledning — skaber kvantefluktuasjoner lige uden for horisonten par, hvor den ene partner undslipper som stråling, mens den anden falder ind.

Det afgørende er, at denne temperatur er *omvendt* proportional med det sorte huls masse: Jo mindre hullet er, desto varmere er det. For ethvert sort hul, et teleskop kan se, er temperaturen ufatteligt lav — langt under temperaturen i det tomme rum omkring det — så gløden er i praksis fuldstændig ubetydelig og er aldrig blevet målt direkte. Betydningen er begrebsmæssig: Hawking-stråling gør *analogien* mellem sorte hullers mekanik og termodynamik til virkelig termodynamik. Fordi hullet faktisk har en temperatur, er »temperatur« og »entropi« i disse love reelle termodynamiske størrelser, ikke et formelt sammentræf. (Dette er baggrund for den aktuelle artikel, ikke et af dens resultater.)

Denne korrespondance forankres af et resultat kaldet **den første lov for sorte hullers mekanik** (Bardeen, Carter og Hawking, 1973). Med ord siger den: Hvis man forstyrrer et sort hul fra én stabil tilstand til en nærliggende stabil tilstand, er ændringen i massen lig temperaturen ganget med ændringen i entropien plus et led for rotationen. Det er sorte hullers version af »tilført varme er lig temperatur gange ændring i entropi«.

Men der gemmer sig en hage i udtrykket *nærliggende stabil tilstand*. Den rene lov fra 1973 sammenligner to sorte huller, der ligger stille i ligevægt og kun adskiller sig uendeligt lidt fra hinanden. Den beskriver aldrig en faktisk **proces** — et sort hul, der sluger en stjerne, to sorte huller, der smelter sammen, eller et nyfødt hul, der ringer ned efter en voldsom fødsel. Det er netop de situationer, vi helst vil forstå, og de er det modsatte af at »ligge stille«. Den pæne lov bliver tavs, netop når det sorte hul bliver interessant.

Hvorfor den oplagte løsning ikke virker

Man kunne tro, at løsningen er enkel: Følg bare horisonten, mens stof falder ind. Problemet er *hvilken* horisont.

Den horisont, de fleste forestiller sig — **begivenhedshorisonten**, det egentlige punkt uden retur — har en subtil og besværlig egenskab: Den defineres af hele universets fremtid. For at vide, hvor begivenhedshorisonten er *lige nu*, skulle man kende alt, der nogensinde vil falde ind i hullet, i al fremtid. Det er ikke en teknisk detalje. En begivenhedshorisont kan begynde at vokse i et helt tomt, fladt område af rummet *før* det stof, som senere vil føde hullet, er nået frem, blot fordi dette stof er bestemt til at ankomme senere. Arealet kan vokse et sted, hvor der lokalt slet intet sker.

Hvordan kan en horisont vokse, før stoffet ankommer?

Det videnskabelige navn på dette problem er begivenhedshorisontens **teleologiske natur**, også kaldet dens **globale definition**. »Teleologisk« betyder her ikke, at horisonten har et formål, forudsiger fremtiden eller sender en påvirkning bagud i tiden. Det betyder, at spørgsmålet om, hvorvidt en hændelse ligger inden for horisonten, kun kan afgøres ved at kende hele rumtidens fremtidige historie.

Den formelle definition siger det samme mere kompakt. Forestil dig **fremtidig nul-uendelighed** — kaldet »I-plus« og skrevet $\mathcal{I}^+$ — som det mål, lys når, når det undslipper for altid ind i en ellers tom, uendeligt fjern fremtid. Begivenhedshorisonten er grænsen mellem hændelser, hvorfra et udadgående lyssignal til sidst kan nå dette mål, og hændelser, hvorfra ingen sådanne signaler nogensinde kan gøre det. I standardnotationen i generel relativitet er den grænsen til den kausale fortid for fremtidig nul-uendelighed: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Fordi ordet *nogensinde* er indbygget i definitionen, kan ingen måling, der kun foretages her og nu, lokalisere begivenhedshorisonten præcist.

En kollapsende kugleformet skal gør det mærkelige synligt. Før skallen når frem, kan området inden i den være tomt og lokalt fladt. Send udadgående lysstråler fra centrum på stadig senere tidspunkter: De tidlige stråler undslipper, mens de senere møder den kollapsende skal i en geometri, de ikke kan komme ud af. Begivenhedshorisonten er grænsen, der adskiller disse to udfald. Følger man grænsen bagud, begynder den i centrum og udvider sig gennem det stadig tomme, flade indre, før skallen når frem. Det voksende areal rapporterer ingen lokal strøm af stof dér; det registrerer, hvilke flugtveje der stadig er åbne i den fuldendte rumtid.

Intet i dette billede virker bagud i tiden. Hvis skallen blev afbøjet, og der ikke blev dannet noget sort hul, ville den fuldendte rumtid være anderledes, og det tidligere område ville ikke have været del af en begivenhedshorisont. Læren er ikke, at fremtiden ændrer fortiden, men at en begivenhedshorisont er en **global kausal grænse**, ikke en overflade, som en observatør i nærheden kan registrere i ét øjeblik. Netop derfor bruger fysikere kvasi-lokale eller dynamiske horisonter, når de vil følge et sort hul, mens det forandrer sig.

Dette gør begivenhedshorisonten ubrugelig som en løbende beskrivelse af et sort huls »tilstand«. Den kan ikke engang lokaliseres i en computersimulering, før simuleringen er færdig, og kan slet ikke bruges til at følge temperatur eller entropi øjeblik for øjeblik.

Grebet: en horisont, der kan defineres lokalt

Den nye artikel af Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo og Jonathan Shu bygger resultatet på en anden type horisont — en **kvasi-lokal** horisont, defineret alene af geometrien i sit eget nærområde, uden henvisning til den uendelige fremtid. Disse »dynamiske horisontsegmenter« er de overflader, numeriske relativister allerede bruger til at finde sorte huller i simuleringer af sammensmeltninger, netop fordi de er lokale og ærlige: Arealet vokser kun dér, hvor energi faktisk krydser dem.

Derudover løser forfatterne den vanskeligere halvdel af problemet. I almindelig termodynamik er et system langt fra ligevægt notorisk vanskeligt at beskrive: Man kan ikke entydigt tildele det én temperatur eller ét tryk, fordi disse størrelser først er veldefinerede, når systemet er faldet til ro. Sorte huller har det samme problem — indtil forfatterne viser, at man kan bruge et særtræk ved generel relativitet. Et sort hul i ligevægt, et Kerr-sort hul, bestemmes kun af to tal: størrelse og spin. Forfatterne konstruerer derfor et kort, som tager en vilkårlig voldsomt udviklende horisont uden for ligevægt og på hvert tidspunkt aflæser de to tal for det ligevægtssorte hul, den da ligner. Gennem dette kort kan selv et hurtigt skiftende sort hul tildeles en **tidsafhængig temperatur og et tidsafhængigt spin**.

Med disse bestanddele — lokalt defineret energi, der strømmer over horisonten, og øjeblikkelige intensive størrelser — udvider de den første lov til sorte huller vilkårligt langt fra ligevægt. Det afgørende er, at den nye lov beskriver **endelige ændringer forårsaget af virkelige fysiske processer** — stof og gravitationsbølger, der krydser horisonten — ikke uendeligt små skridt mellem to frosne tilstande. De kobler den til en tilsvarende anden lov, som nu er *kvantitativ*: Horisontarealet vokser med en størrelse, der er direkte knyttet til den energi, der strømmede ind. Samlet peger den første og anden lov mod én klar konklusion: Selv for et sort hul midt i den voldsomste hændelse, man kan forestille sig, er horisontarealet stadig det rigtige mål for entropi.

Hvad dette *ikke* beviser

- Det løser **ikke** kvantegravitation. Dette er et resultat i *klassisk* generel relativitet med den sædvanlige identifikation af horisontareal som entropi. Det udleder ikke denne entropi fra noget mere fundamentalt.
- Det tæller **ikke** mikrotilstande og forklarer ikke, *hvad* et sort huls entropi består af. Det udvider bogføringen i sorte hullers termodynamik; det åbner ikke boksen og afslører de mikroskopiske frihedsgrader.
- Det løser **ikke** sorte hullers informationsparadoks. Dette problem hører hjemme i kvanteteorien; artiklen berører det ikke.
- Det er **ikke** en observation eller måling. Ingen teleskoper, data eller gravitationsbølgesignaler er involveret — dette er matematik. »Temperaturen« af et sammensmeltende sort hul er her en præcist defineret størrelse i ligningerne, ikke noget man kunne aflæse på et termometer.
- Det vælter **ikke** Bekenstein og Hawking. Det *udvider* deres billede til det dynamiske regime, hvor den oprindelige lov, begrænset til ligevægt, ikke havde noget at sige.

Hvor stærk er evidensen?

Stærk for den type resultat, dette er: et grundigt og internt konsistent arbejde i matematisk fysik fra en førende gruppe på feltet, udgivet som en *Editors' Suggestion* i Physical Review Letters. En ledsagende artikel gennemgår de længere udledninger.

De ærlige forbehold gælder *typen*, ikke kvaliteten:

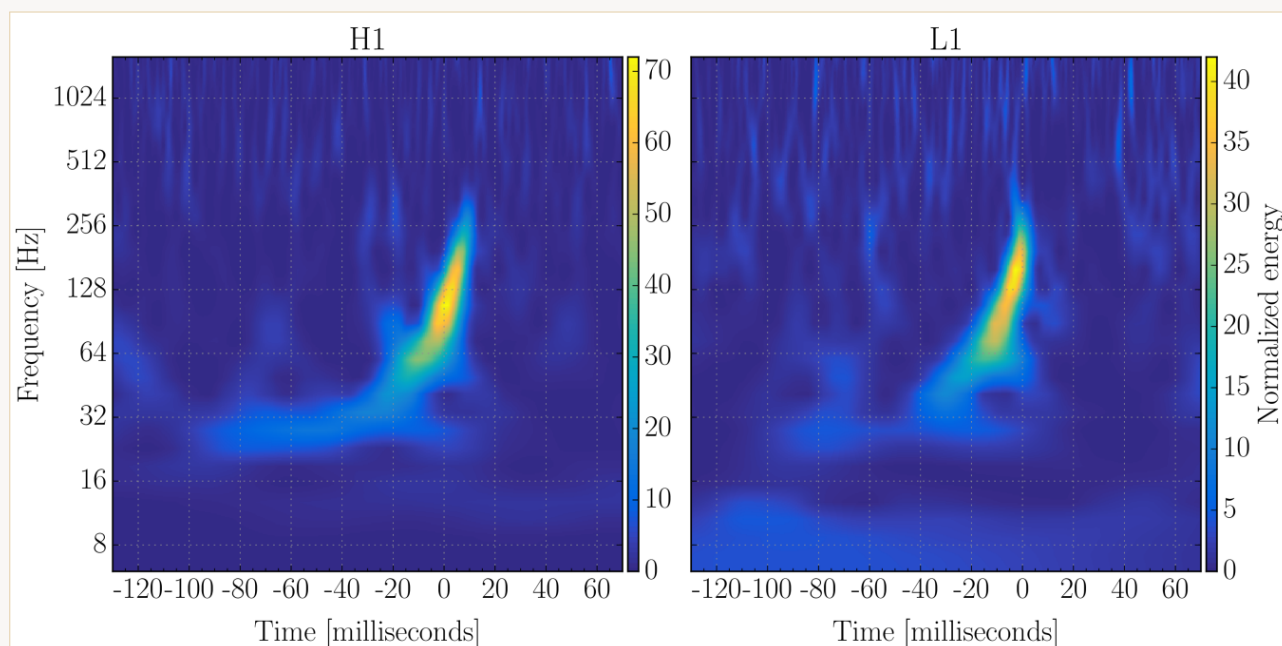
- Resultatet bygger på den sædvanlige antagelse om, at horisontareal *er* entropi — arealet divideret med fire gange Newtons konstant og Plancks konstant. Hvis denne identifikation en dag revideres af en fuldstændig teori for kvantegravitation, vil fortolkningen ændre sig med den.
- Hovedberegningerne er udført for det mest almindelige tilfælde, rumlige dynamiske horisonter med aksialsymmetri. Forfatterne argumenterer for, at begrænsningerne ikke er fundamentale, men den fuldt generelle formulering støtter sig på resultater andre steder.
- »Entropi er lig horisontareal, også uden for ligevægt« er en overbevisende *identifikation*, som gøres naturlig af de nye første og anden love — ikke et teorem udledt fra mikroskopisk statistik.

Altså: en stringent udvidelse af en halvtreds år gammel ramme, ikke en eksperimentel opdagelse og ikke en ny naturlov, der venter på at blive testet.

Hvorfor det betyder noget

To grunde, én praktisk og én begrebsmæssig.

Praktisk er de sorte huller, vi nu faktisk studerer — dem LIGO og Virgo hører smelte sammen — langt fra ligevægt i deres vigtigste øjeblikke. Størrelserne i denne artikel er bygget af de samme lokalt definerede horisonter, som simuleringer allerede følger. Dermed giver arbejdet en principiel måde at tale om entropien og temperaturen af et sort hul *under* en sammensmeltning eller et kollaps, ikke kun før og efter.



GW150914, det første gravitationsbølgesignal, der blev direkte registreret, kom fra to sorte huller, som smeltede sammen. Disse tids-frekvensdiagrammer viser signalet i LIGO Hanford til venstre og LIGO Livingston til højre: I begge detektorer bøjer det lyse spor opad, når signalets frekvens stiger mod sammensmeltningen. Dette er et virkeligt eksempel på et system af sorte huller langt fra ligevægt; det giver kontekst for den nye termodynamiske ramme, men er ikke observationsbevis for den.

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

Begrebsmæssigt er sorte hullers termodynamiske adfærd et af de få konkrete spor, vi har mod kvantegravitation — stedet, hvor gravitation, kvanteteori og termodynamik synligt mødes. At præcisere nøjagtigt, hvad »entropi« og »temperatur« betyder for et sort hul, der ændrer sig voldsomt, skærper det mål, enhver fremtidig kvanteteori skal ramme. Det besvarer ikke det dybe spørgsmål om, hvad et sort huls entropi egentlig er. Det formulerer spørgsmålet mere præcist — hvilket i denne del af fysikken er det meste af arbejdet.

Kort fortalt

Sorte huller følger love, der spejler termodynamikken, men den pæne »første lov« fra 1973 sammenlignede kun sorte huller, der lå stille i ligevægt, og kunne ikke beskrive en faktisk proces. Ashtekar, Paraizo og Shu udvider både den første og anden lov til sorte huller vilkårligt langt fra ligevægt — under sammensmeltning, tilførsel af stof og nedringning — ved at bruge lokalt definerede »dynamiske horisonter« og et kort, der tildeler et skiftende sort hul en øjeblikkelig temperatur og et øjeblikkeligt spin. Konklusionen er, at horisontarealet stadig er det rigtige mål for entropi under voldsomme hændelser. Dette er et stringent resultat i klassisk generel relativitet, ikke kvantegravitation, ikke en observation, ikke en optælling af mikrotilstande og ikke en løsning på informationsparadokset.

Nøgtern vurdering

Hvad artiklen viser: En matematisk konsistent udvidelse af den første og anden lov for sorte hullers mekanik til fuldt dynamiske sorte huller langt fra ligevægt, bygget på kvasi-lokale dynamiske horisonter. Den definerer en endelig, procesbaseret første lov og en kvantitativ anden lov og gør det naturligt at identificere et dynamisk sort huls entropi med horisontarealet.

Hvad der er reelt, men fortolkende: Identifikationen »entropi = horisontareal« uden for ligevægt. De nye love gør den overbevisende, men den arver den sædvanlige klassiske antagelse om areal og entropi i stedet for at udlede den.

Hvad den ikke viser: En kvanteteori for gravitation; et mikroskopisk ophav eller en »optælling« af sorte hullers entropi; en løsning på informationsparadokset; noget observations- eller forsøgsresultat; en temperatur, der fysisk kan måles.

Vigtigste begrænsninger: Klassisk generel relativitet hele vejen; hovedresultaterne er bevist for det almindelige rumlige, aksialsymmetriske tilfælde, mens generaliteten argumenteres gennem ledsagende arbejde; identifikationen mellem areal og entropi antages og bevises ikke fra statistisk mekanik.

Hvor stor tillid bør en almindelig læser have? Høj tillid til, at dette er et solidt og anerkendt teoretisk fremskridt, som reelt udvider sorte hullers termodynamik til det dynamiske regime. Lige så høj tillid til, at det *ikke* er en påstand om nye observationer, ikke kvantegravitation og ikke en løsning på det berømte informationsproblem. Den rette holdning er: et reelt skridt i forståelsen, taget med kridt 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>