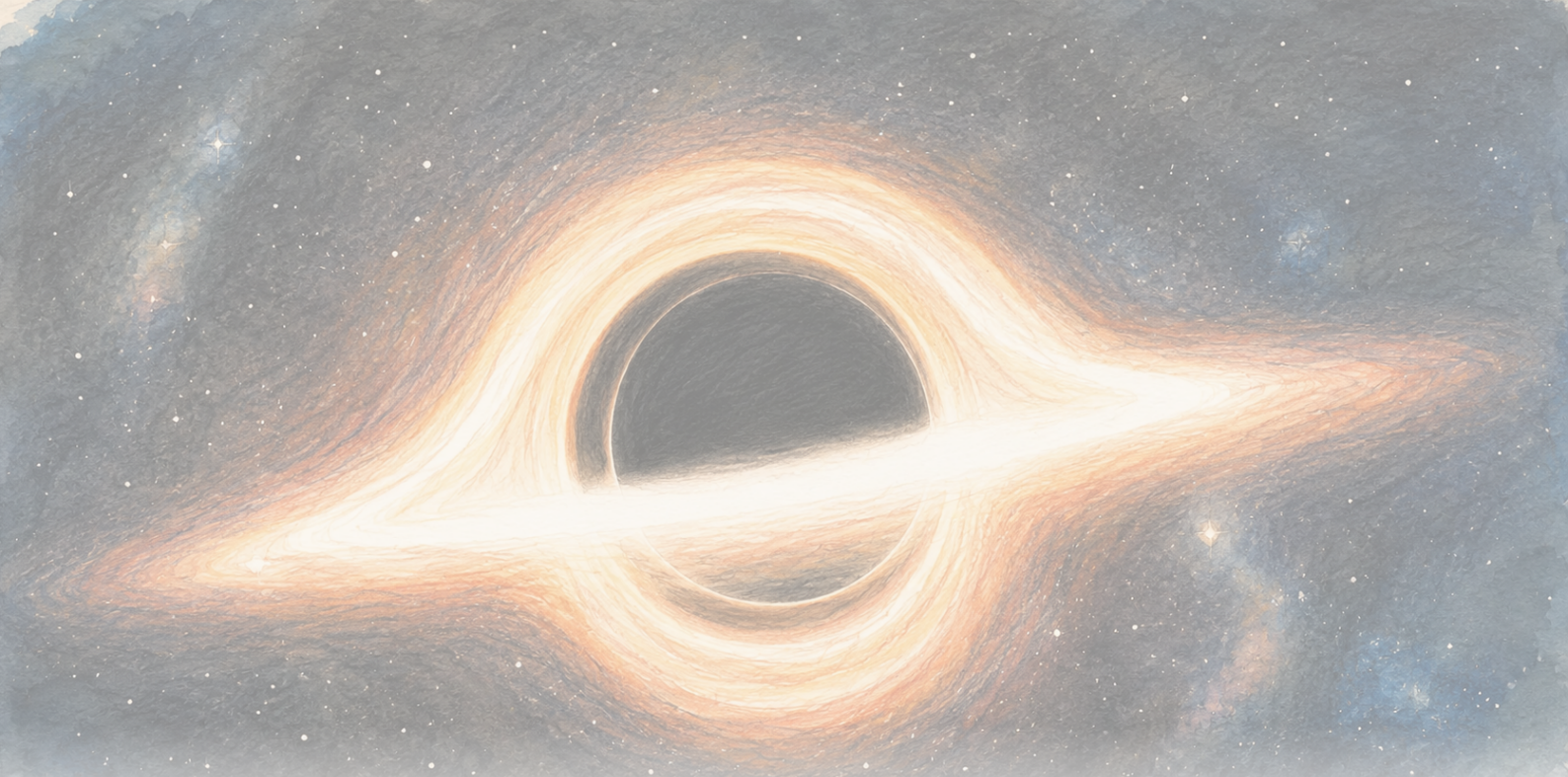




The CLEAN PAPER

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 afspejler termodynamikken, men den mest elegante version gjaldt kun sorte huller, der lå stille i ligevægt. En ny artikel i Physical Review Letters udvider den første og anden lov til de dele af kvasi-lokale horisonter, der kvalificerer sig som dynamiske horisontsegmenter og kan befinde sig vilkårligt langt fra ligevægt — under akkretion, kollaps og de fleste faser af en sammensmeltning mellem sorte huller. Simuleringer følger den kvasi-lokale horisont under hele sammensmeltningen, men lovene dækker endnu ikke det korte interval omkring koalescensen, hvor den ikke er et dynamisk horisontsegment. Den grundlæggende ramme ligger i generel relativitet med en semiklassisk anvendelse på fordampning; der er ikke tale om ny kvantegravitation, en observation eller 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 kvantefluktuationer 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 sit resultat på et andet horisontbegreb — et **kvasi-lokalt** begreb, der alene er defineret af geometrien i sit eget nærområde uden henvisning til den uendelige fremtid. Disse **kvasi-lokale horisonter** er de overflader, som numeriske relativister allerede bruger til at lokalisere de oprindelige sorte huller, følge sammensmeltningen og lokalisere restobjektet gennem hele en simulering. De termodynamiske love, der udvikles her, gælder for de dele af en kvasi-lokal horisont, som opfylder de yderligere betingelser for et **dynamisk horisontsegment**. På hvert sådant segment ændrer arealet sig direkte som reaktion på den lokale energiflux og ikke på begivenheder i en fjern fremtid: Det vokser ved positiv indstrømning og mindskes for en fordampende tidslig horisont med negativ energiflux.

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 en afbildning, som tager hver tilstand langs et dynamisk horisontsegment og ved hvert tværsnit af segmentet aflæser de to tal for det ligevægtssorte hul, tilstanden da ligner. Gennem denne afbildning kan et voldsomt skiftende sort hul langs segmentet tildeles en **tidsafhængig temperatur og et tidsafhængigt spin**.

Med disse elementer — en 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 infinitesimale skridt mellem to fastfrosne tilstande. De kobler den til en tilsvarende anden lov, hvis udsagn nu er *kvantitativt*: Ændringen i horisontens areal er direkte knyttet til den lokale energiflux — vækst ved positiv indstrømning eller fald for en tidslig, fordampende horisont ved negativ flux. Samlet peger den første og anden lov på én klar konklusion: For enhver fase, der repræsenteres af et dynamisk horisontsegment, uanset hvor voldsom den er, er horisontens areal fortsat det rette mål for entropi.

Hvad dette *ikke* beviser

- Det løser **ikke** kvantegravitation. Den grundlæggende ramme er formuleret i generel relativitet; dens anvendelse på sorte hullers fordampning benytter den semiklassiske approksimation, hvor kvantemekaniske stoffelter virker på en klassisk rumtid. Den forudsætter fortsat den gængse identifikation af horisontareal med entropi frem for at udlede denne entropi af 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 en måling. Intet teleskop, ingen data og intet gravitationsbølgesignal er involveret — dette er matematik. Den »temperatur«, som en dynamisk horisont tildeles, mens et sort hul udvikler sig, er en præcist defineret størrelse i ligningerne, ikke noget, man kunne aflæse på et termometer.
- Det giver **endnu ikke** en sammenhængende termodynamisk beskrivelse af hele koalescensen mellem to sorte huller. Numeriske simuleringer følger den kvasi-lokale horisont gennem hele udviklingen — fra de oprindelige sorte huller over sammensmeltningen til restobjektet — men i et kort interval meget tæt på sammensmeltningen opfylder denne horisont ikke de betingelser, der kræves af et dynamisk horisontsegment. Ifølge den ledsagende artikel er en termodynamisk redegørelse for dette interval stadig under udarbejdelse.
- 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, der er tale om: et omhyggeligt og internt konsistent arbejde i matematisk fysik fra en førende gruppe på området, udgivet som en *Editors' Suggestion* i Physical Review Letters. En fagfællebedømt ledsagende artikel giver de længere udledninger og behandler de tilfælde, som er sammenfattet i den korte artikel.

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.
- Af hensyn til korthed og enkelhed præsenterer den korte artikel hovedudledningen ved hjælp af aksialsymmetriske, rumlige dynamiske horisonter. Den fagfællebedømte ledsagende artikel analyserer udtrykkeligt tidslige dynamiske horisonter og konstruerer impulsmoment uden et rotationelt Killing-felt. For fordampende tidslige horisonter er den eksplicitte behandling af tilbagereaktionen dog begrænset til sfærisk symmetri.
- »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.

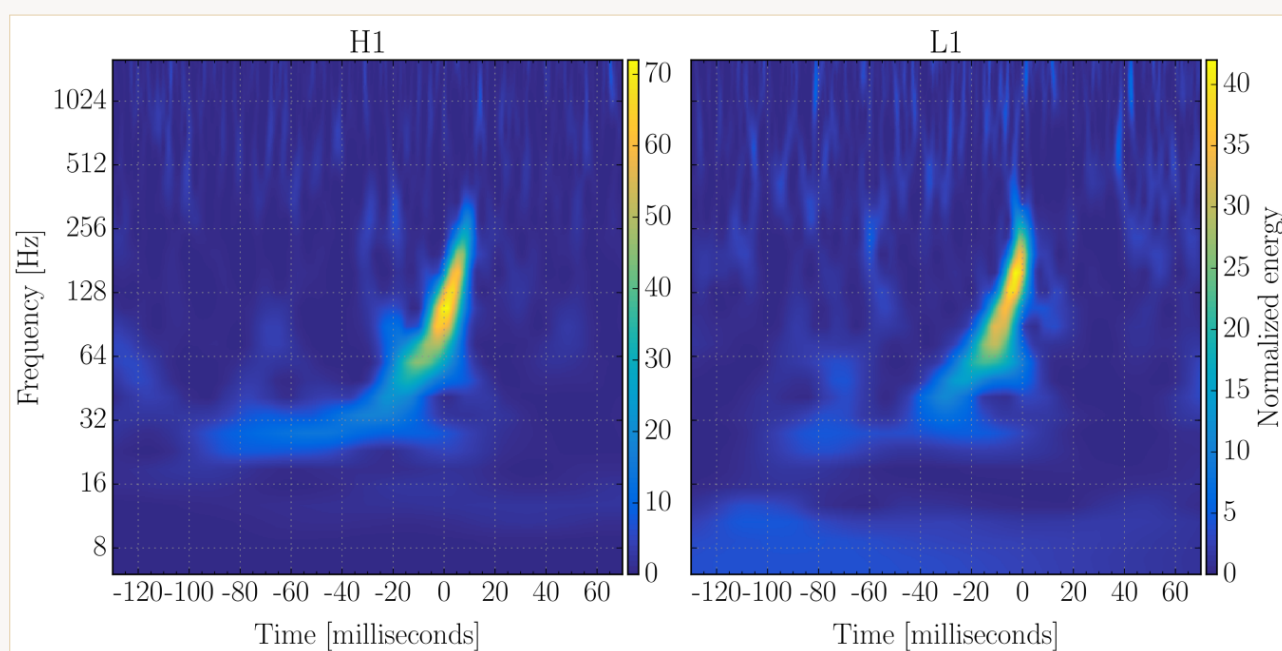
Altså: en stringent udvidelse af en halvtreds år gammel ramme, ikke en eksperimentel opdagelse og ikke en ny naturlov, der venter på at blive testet.

Hvorfor det betyder noget

To grunde, én praktisk og én begrebsmæssig.

I praksis tilbringer de sorte huller, vi faktisk studerer i dag — dem, hvis sammensmeltninger LIGO

og Virgo hører — deres vigtigste øjeblikke langt fra ligevægt. Simuleringer følger den kvasi-lokale horisont fra de oprindelige sorte huller over sammensmeltningen til restobjektet. Størrelserne i denne artikel gælder for de dele af horisonten, der kvalificerer sig som dynamiske horisontsegmenter, og giver dermed en principiel måde at tale om et sort huls entropi og temperatur gennem de fleste faser af en sammensmeltning og under kollaps, ikke kun efter at alt er faldet til ro. I det korte interval umiddelbart omkring koalescensen følges den kvasi-lokale horisont fortsat, men ligger uden for den nuværende termodynamiske beskrivelse.



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 afspejler termodynamikken, men den elegante »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 den anden lov til sorte huller vilkårligt langt

fra ligevægt — mens de optager stof, kolliderer, ringer af og gennemgår de fleste faser af en sammensmeltning — ved at bruge kvasi-lokale horisonter, anvende de termodynamiske love på deres dynamiske horisontsegmenter og konstruere en afbildning, der tildeler hver tilstand langs disse segmenter en øjeblikkelig temperatur og et øjeblikkeligt spin. Konklusionen er, at horisontarealet fortsat er det rette mål for entropi i enhver fase, der repræsenteres af et dynamisk horisontsegment. Det korte interval meget tæt på koalescensen er endnu ikke dækket af denne termodynamiske beskrivelse, selv om simuleringer fortsat følger den kvasi-lokale horisont. Den grundlæggende ramme ligger i generel relativitet med en semiklassisk anvendelse på fordampning; den er ikke kvantegravitation, en observation, en optælling af mikrotilstande eller 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 horisonter og de dele af dem, der opfylder betingelserne for dynamiske horisontsegmenter. 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: Den grundlæggende udledning ligger i generel relativitet, mens anvendelsen på tidlig fordampning benytter den semiklassiske approksimation; det korte interval meget tæt på en binær koalescens repræsenteres ikke af et dynamisk horisontsegment, og dets termodynamiske beskrivelse er fortsat under udarbejdelse, selv om numeriske simuleringer fortsat følger den kvasi-lokale horisont; den eksplicite behandling af tilbagereaktionen for fordampende tidlige horisonter er begrænset til sfærisk symmetri; identifikationen af areal med entropi forudsættes og bevises ikke ud 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.

Opdateringer efter offentliggørelse

- Rettelse · 2026-08-27

Efter feedback fra den korresponderende forfatter Abhay Ashtekar rettede vi to udsagn, som havde beskrevet tidslige og ikke-aksialsymmetriske tilfælde som blot argumenteret for i stedet for udtrykkeligt behandlet i den fagfællebedømte ledsagende artikel. Under gennemgangen præciserede vi også, at rammen endnu ikke dækker det korte interval meget tæt på en binær koalescens, hvor den kvasi-lokale horisont ikke opfylder betingelserne for et dynamisk horisontsegment.

- **Rettelse · 2026-08-28**

Efter en yderligere præcisering fra den korresponderende forfatter Abhay Ashtekar har vi skelnet mellem kvasi-lokale horisonter, som numeriske simuleringer følger fra de oprindelige sorte huller over sammensmeltningen til restobjektet, og de dele, der opfylder de yderligere betingelser for dynamiske horisontsegmenter, hvor de termodynamiske love gælder.

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>