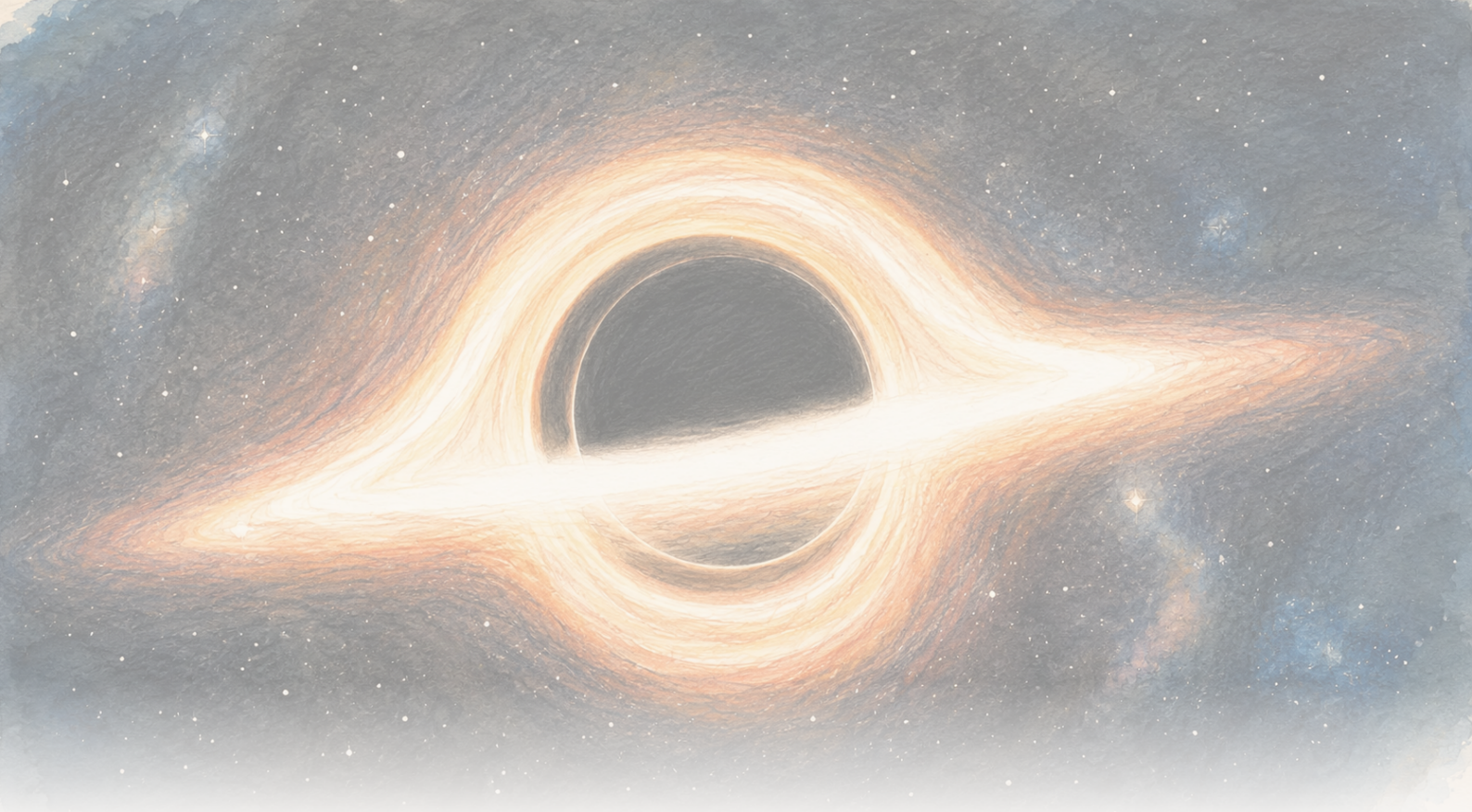




The CLEAN PAPER

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

Zwarte gaten volgen thermodynamische ‘wetten’ — een nieuw resultaat breidt die uit naar zwarte gaten die heftig buiten evenwicht zijn

Sinds de jaren zeventig is bekend dat zwarte gaten wetten volgen die thermodynamica weerspiegelen, maar de elegantste versie gold alleen voor zwarte gaten die rustig in evenwicht zaten. Een nieuw artikel in Physical Review Letters breidt de eerste en tweede wet uit naar zwarte gaten die snel veranderen — materie opslokken, samensmelten, stralen — met lokaal gedefinieerde ‘dynamische horizonden’. Daardoor kunnen natuurkundigen zelfs aan een heftig evoluerend zwart gat een temperatuur en entropie toekennen. Het is een wiskundig resultaat binnen de klassieke algemene relativiteit, geen nieuwe kwantumzwaartekracht, geen waarneming en geen oplossing van het informatieprobleem van zwarte gaten.

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

Zwarte gaten hebben „wetten” die op thermodynamica lijken. De keurige versie werkte alleen wanneer er niets gebeurde

Een van de vreemdste feiten in de natuurkunde is dat zwarte gaten zich gedragen als warme objecten. Begin jaren zeventig merkten Bekenstein en Hawking op dat de vergelijkingen die zwarte gaten beheersen term voor term overeenkomen met de wetten van de thermodynamica: een zwart gat heeft een entropie die evenredig is met het oppervlak van zijn horizon, en een temperatuur die evenredig is met zijn oppervlaktezwaartekracht. Hawking liet vervolgens zien dat die temperatuur in de diepste zin echt is — een zwart gat gloeit werkelijk, zij het uiterst zwak, met thermische straling.

Wat is Hawkingstraling?

Klassiek kan niets uit een zwart gat ontsnappen, dus zou het volmaakt zwart moeten zijn en helemaal geen temperatuur mogen hebben. In 1974 liet Stephen Hawking zien dat dit verandert zodra kwantumtheorie nabij de horizon wordt meegenomen: een zwart gat zendt een zwakke thermische gloed uit en verliest daardoor langzaam massa, of „verdampt”. Het spectrum is thermisch bij de Hawkingtemperatuur, terwijl de voortplanting door gekromde ruimtetijd de straling verandert die oneindig ver weg aankomt. In een veelgebruikte heuristische voorstelling — niet Hawkings eigen afleiding — creëren kwantumfluctuaties vlak buiten de horizon paren waarvan één partner als straling ontsnapt en de andere naar binnen valt. Het sleutelkenmerk is dat deze temperatuur *omgekeerd* evenredig is met de massa van het zwarte gat: hoe kleiner het gat, hoe warmer. Voor elk zwart gat dat een telescoop zou kunnen zien is de temperatuur onvoorstelbaar laag — veel lager dan die van de lege ruimte eromheen — zodat de gloed in de praktijk volstrekt verwaarloosbaar is en nooit rechtstreeks is gemeten. Het belang is conceptueel: Hawkingstraling maakt van de *analogie* tussen de mechanica van zwarte gaten en thermodynamica een echte thermodynamische relatie. Omdat het zwarte gat werkelijk een temperatuur heeft, zijn „temperatuur” en „entropie” in deze wetten echte thermodynamische grootheden, geen formeel toeval. (Dit is achtergrond bij het huidige artikel, niet een van de resultaten ervan.)

Die overeenkomst wordt verankerd door een resultaat dat de **eerste wet van de mechanica van zwarte gaten** heet (Bardeen, Carter en Hawking, 1973). In woorden: wanneer je een zwart gat van één stationaire toestand een klein duwtje geeft naar een nabijgelegen stationaire toestand, is de verandering in zijn massa gelijk aan zijn temperatuur maal de verandering in entropie, plus een term voor zijn rotatie. Het is de zwart-gatversie van „toegevoerde warmte is temperatuur maal verandering in entropie”.

Er zit een addertje in de woorden *nabijgelegen stationaire toestand*. De elegante wet uit 1973 vergelijkt twee zwarte gaten die rustig in evenwicht verkeren en slechts infinitesimaal van elkaar verschillen. Ze beschrijft nooit werkelijk een **proces** — een zwart gat dat een ster verslindt, twee zwarte gaten die samensmelten, een pasgeboren zwart gat dat na een gewelddadige geboorte uittrilt. Dat zijn precies de situaties die we het liefst willen begrijpen, en ze zijn het tegenovergestelde van „rustig stilzitten”.

De keurige wet zwijgt precies wanneer het zwarte gat interessant wordt.

Waarom de voor de hand liggende oplossing niet werkt

Je zou kunnen denken dat de oplossing eenvoudig is: kijk gewoon hoe de horizon groeit terwijl materie naar binnen valt. Het probleem is *welke* horizon.

De horizon die de meeste mensen voor zich zien — de **gebeurtenishorizon**, het echte punt waarachter geen terugkeer mogelijk is — heeft een subtiële en lastige eigenschap: hij wordt gedefinieerd door de volledige toekomst van het universum. Om te weten waar de gebeurtenishorizon *nu* ligt, zou je alles moeten weten wat ooit, tot in het oneindige, in het gat zal vallen. Dat is geen technisch detail. Een gebeurtenishorizon kan beginnen te groeien in een volledig lege, vlakke regio van de ruimte *voordat* de materie die hem zal voeden is aangekomen, enkel omdat die materie later onvermijdelijk aankomt. Zijn oppervlak kan toenemen waar lokaal helemaal niets gebeurt.

Hoe kan een horizon groeien voordat de materie aankomt?

De wetenschappelijke naam voor dit raadsel is het **teleologische karakter van de gebeurtenishorizon**, ook wel zijn **globale definitie** genoemd. „Teleologisch” betekent hier niet dat de horizon een doel heeft, de toekomst voorspelt of een invloed achteruit door de tijd stuurt. Het betekent dat alleen uit de volledige toekomstige geschiedenis van de ruimtetijd kan worden bepaald of een gebeurtenis binnen de horizon ligt.

De formele definitie zegt hetzelfde compacter. Stel je **toekomstig nul-oneindig** voor — „I-plus”, geschreven als $\mathcal{I}^+$ — als de bestemming die licht bereikt wanneer het voorgoed ontsnapt naar een verder lege, oneindig verre toekomst. De gebeurtenishorizon is de grens tussen gebeurtenissen vanwaar een naar buiten gestuurd lichtsignaal uiteindelijk die bestemming kan bereiken en gebeurtenissen vanwaar geen enkel signaal dat ooit kan. In de standaardnotatie van de algemene relativiteit is hij de grens van het causale verleden van toekomstig nul-oneindig: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Omdat het woord *ooit* in die definitie ingebouwd zit, kan geen meting die alleen hier en nu wordt gedaan de gebeurtenishorizon exact lokaliseren.

Een instortende bolschil maakt de vreemdheid zichtbaar. Voordat de schil aankomt kan het gebied erbinnen leeg en lokaal vlak zijn. Stuur vanaf het centrum op steeds latere tijdstippen lichtstralen naar buiten: de eerdere stralen ontsnappen, terwijl de latere de instortende schil ontmoeten in een geometrie waaruit ze niet meer weg kunnen. De gebeurtenishorizon is de grens die die twee uitkomsten scheidt. Achterwaarts gevolgd begint die grens in het centrum en zet hij uit door het nog lege, vlakke binnengebied voordat de schil hem bereikt. Het groeiende oppervlak meldt daar geen lokale stroom van materie; het registreert welke ontsnappingsroutes in de voltooide ruimtetijd open blijven.

Niets in dit beeld werkt achteruit in de tijd. Als de schil zou worden omgeleid en geen zwart gat ontstond, zou de voltooide ruimtetijd anders zijn en zou dat eerdere gebied geen deel van een gebeurtenishorizon zijn geweest. De les is niet dat de toekomst het verleden verandert, maar dat een gebeurtenishorizon een **globale causale grens** is en geen oppervlak dat een nabije

waarnemer op één ogenblik kan detecteren. Juist daarom gebruiken natuurkundigen quasi-lokale of dynamische horizons wanneer ze een veranderend zwart gat willen volgen.

Dat maakt de gebeurtenishorizon onbruikbaar als doorlopend verslag van de „toestand” van een zwart gat. Zelfs in een computersimulatie kun je hem pas lokaliseren nadat de simulatie is afgelopen, en je kunt hem zeker niet gebruiken om van moment tot moment temperatuur of entropie te volgen.

De stap: een horizon die lokaal kan worden gedefinieerd

Het nieuwe artikel van Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo en Jonathan Shu bouwt zijn resultaat op een ander begrip van horizon — een **quasi-lokale** horizon, die uitsluitend wordt gedefinieerd door de geometrie in zijn eigen omgeving en geen verwijzing naar de oneindige toekomst nodig heeft. Deze „segmenten van dynamische horizons” zijn de oppervlakken die numerieke relativisten al gebruiken om zwarte gaten in fusiesimulaties te vinden, precies omdat ze lokaal en eerlijk zijn: hun oppervlak groeit alleen waar daadwerkelijk energie doorheen stroomt.

Daarbovenop lossen de auteurs de moeilijkere helft van het probleem op. In gewone thermodynamica is een systeem ver van evenwicht berucht glibberig: je kunt er niet netjes één temperatuur of druk aan toekennen, omdat zulke grootheden pas goed gedefinieerd zijn wanneer alles tot rust komt. Zwarte gaten hebben hetzelfde probleem — totdat, zo laten de auteurs zien, je een bijzondere eigenschap van de algemene relativiteit gebruikt. Een zwart gat *in* evenwicht, een Kerr-zwart gat, wordt volledig vastgelegd door slechts twee getallen: zijn grootte en zijn spin. De auteurs construeren daarom een afbeelding die elk wild evoluerend, niet-evenwichtig horizonoppervlak op elk ogenblik koppelt aan de twee getallen van het evenwichtszwart gat waarop het op dat moment lijkt. Via die afbeelding kan zelfs aan een heftig veranderend zwart gat een **tijdafhankelijke temperatuur en spin** worden toegekend.

Met die onderdelen — lokaal gedefinieerde energie die door de horizon stroomt en ogenblikkelijke intensieve grootheden — breiden ze de eerste wet uit naar zwarte gaten die willekeurig ver van evenwicht zijn. Cruciaal is dat de nieuwe wet **eindige veranderingen door echte fysieke processen** beschrijft, zoals materie en zwaartekrachtsgolven die de horizon passeren, en niet infinitesimale stapjes tussen twee bevroren toestanden. Ze koppelen haar aan een overeenkomstige tweede wet die nu *kwantitatief* is: het horizonoppervlak groeit met een hoeveelheid die rechtstreeks verband houdt met de naar binnen gestroomde energie. Samen wijzen de eerste en tweede wet op één heldere conclusie — zelfs midden in de gewelddadigste gebeurtenis die denkbaar is, blijft het horizonoppervlak de juiste maat voor de entropie van een zwart gat.

Wat dit *niet* bewijst

- Het lost de kwantumzwaartekracht **niet** op. Dit is een resultaat binnen de *klassieke* algemene relativiteit, met de standaardidentificatie van horizonoppervlak en entropie. Het leidt die entropie niet uit iets fundamenteelers af.
- Het telt **geen** microtoestanden en verklaart niet waaruit de entropie van een zwart gat *bestaat*. Het breidt de boekhouding van zwart-gatthermodynamica uit; het opent de doos niet om de microscopische vrijheidsgraden te onthullen.
- Het lost de informatieparadox van zwarte gaten **niet** op. Dat vraagstuk behoort tot de kwantumtheorie; dit artikel raakt het niet.
- Het is **geen** waarneming of meting. Er is geen telescoop, geen dataset en geen zwaartekrachtsgolfsignaal bij betrokken — dit is wiskunde. De „temperatuur” van een samensmeltend zwart gat is hier een precies gedefinieerde grootheid in de vergelijkingen, niet iets wat je op een thermometer kunt aflezen.
- Het werpt Bekenstein en Hawking **niet** omver. Het *breidt* hun beeld uit naar het dynamische regime waar de oorspronkelijke, alleen voor evenwicht geldende wet niets te zeggen had.

Hoe sterk is het bewijs?

Sterk, voor wat het is: een zorgvuldig, intern consistent stuk mathematische fysica van een leidende groep in het vakgebied, gepubliceerd als *Editors’ Suggestion* in *Physical Review Letters*; een begeleidend artikel werkt de langere afleidingen uit.

De eerlijke kanttekeningen gaan over het *soort* resultaat, niet over de kwaliteit:

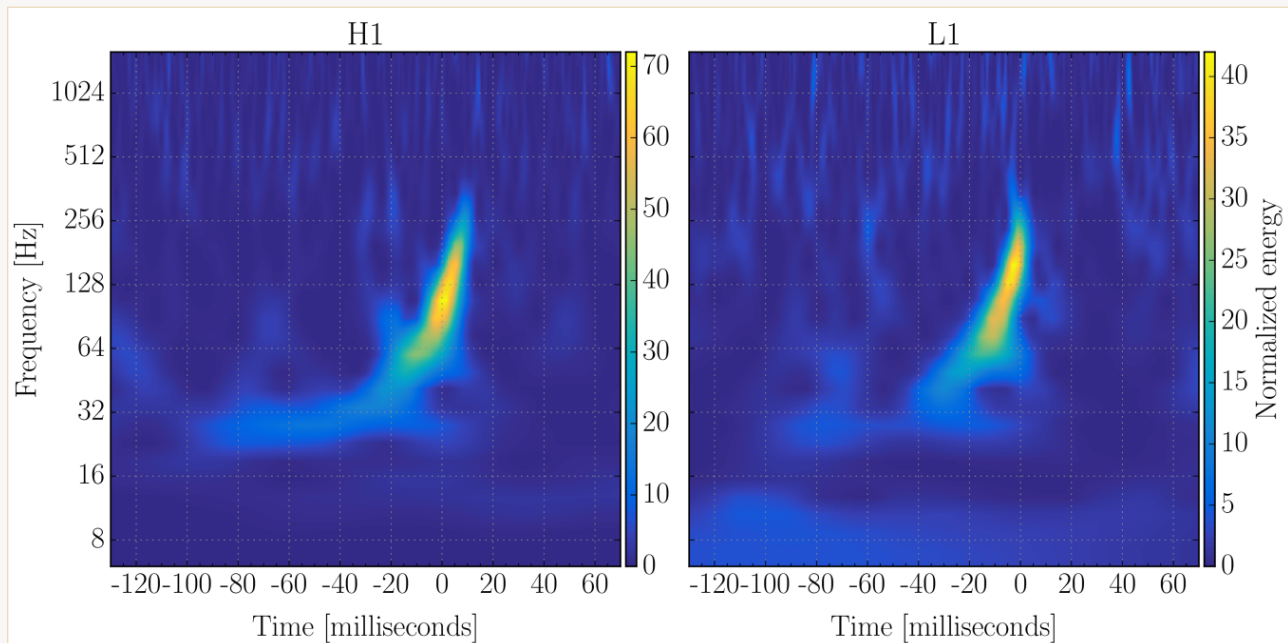
- Het rust op de conventionele aanname dat horizonoppervlak *entropie is* — oppervlak gedeeld door vier keer Newtons constante en Plancks constante. Als een volledige kwantumtheorie van zwaartekracht die identificatie ooit herziet, schuift de interpretatie mee.
- De hoofdrekeningen zijn uitgewerkt voor het meest voorkomende geval: ruimtelijke dynamische horizonten met axiale symmetrie. De auteurs stellen dat de beperkingen niet essentieel zijn, maar de volledig algemene formulering steunt op resultaten elders.
- „Entropie is horizonoppervlak, ook buiten evenwicht” is een overtuigende *identificatie* die door de nieuwe eerste en tweede wet natuurlijk wordt gemaakt, geen stelling die uit microscopische statistiek is bewezen.

Kortom: een rigoureuze uitbreiding van een vijftig jaar oud raamwerk, geen experimentele ontdekking en geen nieuwe natuurwet die nog op toetsing wacht.

Waarom het ertoe doet

Om twee redenen: één praktisch en één conceptueel.

Praktisch gezien brengen de zwarte gaten die we nu werkelijk bestuderen — de systemen die LIGO en Virgo horen samensmelten — hun belangrijkste momenten ver van evenwicht door. De grootheden in dit artikel zijn opgebouwd uit dezelfde lokaal gedefinieerde horizonten die simulaties al volgen. Daardoor biedt het een principiële manier om over de entropie en temperatuur van een zwart gat *tijdens* een fusie of instorting te spreken, niet alleen ervoor en erna.



GW150914, het eerste rechtstreeks gedetecteerde zwaartekrachtsgolfsignaal, kwam van twee samensmeltende zwarte gaten. Deze tijd-frequentiekaarten tonen het signaal in LIGO Hanford (links) en LIGO Livingston (rechts): in beide detectoren loopt het heldere spoor omhoog naarmate de frequentie richting de fusie stijgt. Dit is een echt voorbeeld van een zwart-gatsysteem ver van evenwicht; het dient als context voor het nieuwe thermodynamische raamwerk, niet als waarnemingsbewijs ervoor.

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

Conceptueel is het thermodynamische gedrag van zwarte gaten een van de weinige concrete aanwijzingen die we over kwantumzwaartekracht hebben — hier ontmoeten zwaartekracht, kwantumtheorie en thermodynamica elkaar zichtbaar. Nauwkeuriger vastleggen wat „entropie” en „temperatuur” betekenen voor een heftig veranderend zwart gat verscherpt het doel waaraan elke toekomstige kwantumtheorie moet voldoen. Het beantwoordt niet de diepe vraag wat de entropie van een zwart gat werkelijk is. Het formuleert die vraag preciezer — wat in deze hoek van de natuurkunde het grootste deel van het werk is.

Heldere samenvatting

Zwarte gaten gehoorzamen wetten die thermodynamica weerspiegelen, maar de elegante „eerste wet” uit 1973 vergeleek alleen zwarte gaten die rustig in evenwicht zaten en kon geen werkelijk proces beschrijven. Ashtekar, Paraizo en Shu breiden zowel de eerste als de tweede wet uit naar zwarte gaten die willekeurig ver van evenwicht zijn — samensmeltend, materie opslokkend of uittrillend — door

lokaal gedefinieerde „dynamische horizonten” te gebruiken en een afbeelding die een veranderend zwart gat een ogenblikkelijke temperatuur en spin toekent. De uitkomst is dat horizonoppervlak zelfs tijdens gewelddadige gebeurtenissen de juiste maat voor entropie blijft. Het is een rigoureuus resultaat binnen de klassieke algemene relativiteit, geen kwantumzwaartekracht, geen waarneming, geen telling van microtoestanden en geen oplossing van de informatieparadox.

Zonder omwegen

Wat het artikel laat zien: Een wiskundig consistente uitbreiding van de eerste en tweede wet van de mechanica van zwarte gaten naar volledig dynamische zwarte gaten ver van evenwicht, gebouwd op quasi-lokale dynamische horizonten. Het definieert een eindige, procesgebaseerde eerste wet en een kwantitatieve tweede wet, en maakt het natuurlijk om de entropie van een dynamisch zwart gat met zijn horizonoppervlak te identificeren.

Wat echt maar interpretatief is: De identificatie „entropie = horizonoppervlak” buiten evenwicht. De nieuwe wetten maken haar overtuigend, maar ze erft de standaard klassieke aanname over oppervlak en entropie in plaats van die af te leiden.

Wat het niet laat zien: Een kwantumtheorie van zwaartekracht; een microscopische oorsprong of „telling” van zwart-gatentropie; een oplossing van de informatieparadox; een waarnemings- of experimenteel resultaat; een temperatuur die fysiek gemeten kan worden.

Belangrijkste beperkingen: Uitsluitend klassieke algemene relativiteit; hoofdresultaten bewezen voor het gangbare ruimtelijke, axiaal symmetrische geval, met algemeenheid beargumenteerd via begeleidend werk; de identificatie van oppervlak en entropie wordt aangenomen en niet uit statistische mechanica bewezen.

Hoeveel vertrouwen moet een algemene lezer hebben? Veel vertrouwen dat dit een solide, gerespecteerde theoretische vooruitgang is die zwart-gatthermodynamica werkelijk naar het dynamische regime uitbreidt. Evenveel vertrouwen dat het *geen* claim over nieuwe waarnemingen is, geen kwantumzwaartekracht en geen oplossing van het beroemde informatieprobleem. De juiste houding: een echte stap in begrip, gezet met krijt en niet met een telescoop.

Bronnen

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)
<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>