

Zwaartekrachtsgolven en Hawkings oppervlaktewet

Alweer tien jaar geleden werd [de eerste zwaartekrachtsgolf](#) waargenomen, nadat Einsteins [relativiteitstheorie](#) dat precies honderd jaar daarvoor al had voorspeld. Sindsdien hebben natuurkundigen een compleet nieuwe manier om naar het universum te kijken. Naast het feit dat deze manier van waarnemen een nóg completer beeld geeft van sterrenkundige gebeurtenissen, betekent het ook dat we processen die geen licht uitstralen kunnen bestuderen, zoals het samensmelten van zwarte gaten. Hiermee kunnen ook andere theoretische voorspellingen over bijvoorbeeld zwarte gaten in principe worden getest.



Afbeelding 1. LIGO-interferometer in Hanford. Afbeelding: [NOIRLab/LIGO/NSF/AURA/T. Matsopoulos](https://www.noirlab.edu/LIGO/NSF/AURA/T.Matsopoulos).

Zo [belde Stephen Hawking](#) al vlak na de ontdekking van die eerste zwaartekrachtsgolf met Kip Thorne, een van de grondleggers van het team dat de meting deed. Hij vroeg zich af of een van zijn eigen voorspellingen over zwarte gaten ook zou kunnen worden getest: de voorspelling dat de oppervlakte van zwarte gaten alleen maar kan toenemen.

Zoals al eerder toegelicht in bijvoorbeeld [dit artikel](#) op de QU-website, is het oppervlak van een zwart gat evenredig met de *entropie* ervan:

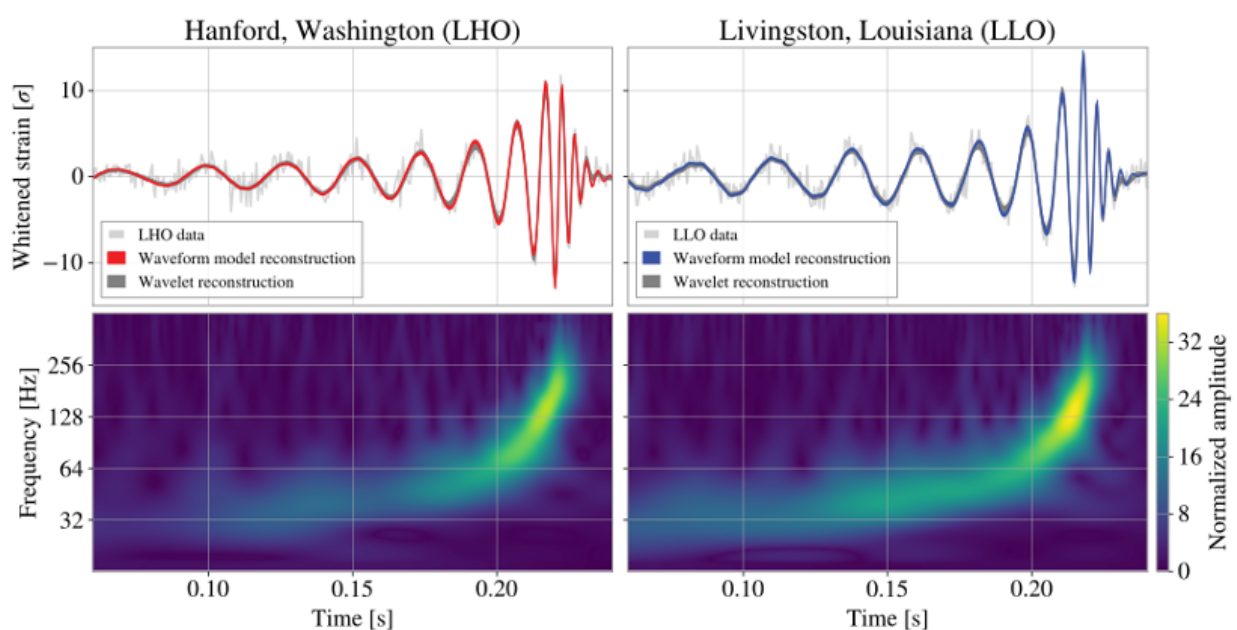
$$\left(S = \frac{A}{4G_N}. \right)$$

Een van de hoofdwetten van de thermodynamica is dat entropie nooit kan afnemen. Een logische conclusie uit bovenstaande formule is dan dus ook dat het oppervlak van een zwart gat in de loop van de tijd nooit afneemt:

$$\left(\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} \geq 0. \right)$$

In eerste instantie lijkt het voor de hand te liggen dat dit waar is: zwarte gaten slokken volgens Einstein immers alles op en zullen dus nooit “krimpen”. De bovenstaande wet gaat echter niet alleen over zulke geleidelijke processen; ook als twee zwarte gaten samensmelten tot één groot zwart gat, zou het oppervlak van het nieuwe zwarte gat minstens even groot moeten zijn als de oppervlakken van beide afzonderlijke zwarte gaten opgeteld. Hoewel dit misschien óók logisch klinkt, is hetzelfde niet het geval voor normale objecten om ons heen. Als je bijvoorbeeld twee perfect ronde bolletjes klei neemt en er een nieuw bolletje klei van maakt, is het totale oppervlak juist afgenomen.

Toen de eerste zwaartekrachtsgolven gemeten waren, was het feit dát ze gemeten waren vooral groot nieuws. Maar in de afgelopen tien jaar heeft de wetenschap grote stappen gezet en hebben we geleerd de signalen een stuk nauwkeuriger te meten. Het eerste signaal, afkomstig van twee zwarte gaten van beide grofweg dertig zonsmassa’s, had een SNR (*signal to noise ratio*) van 26: de onzekerheid in de metingen was grofweg een 26^e van de meetwaarden zelf – zo’n 4%, dus. Een vergelijkbare [detectie uit 2025](#), waarbij de twee zwarte gaten weer beide ongeveer dertig zonsmassa’s zwaar waren, had nu een SNR van wel 80. Deze vooruitgang maakte het mogelijk om de oppervlaktewet met veel hogere zekerheid te testen dan eerst.



Afbeelding 2. Het signaal van GW250114. Data van LIGO Hanford en LIGO Livingston van de zwaartekrachtsgolf GW250114. Afbeelding uit het [artikel van het LVK-](#)

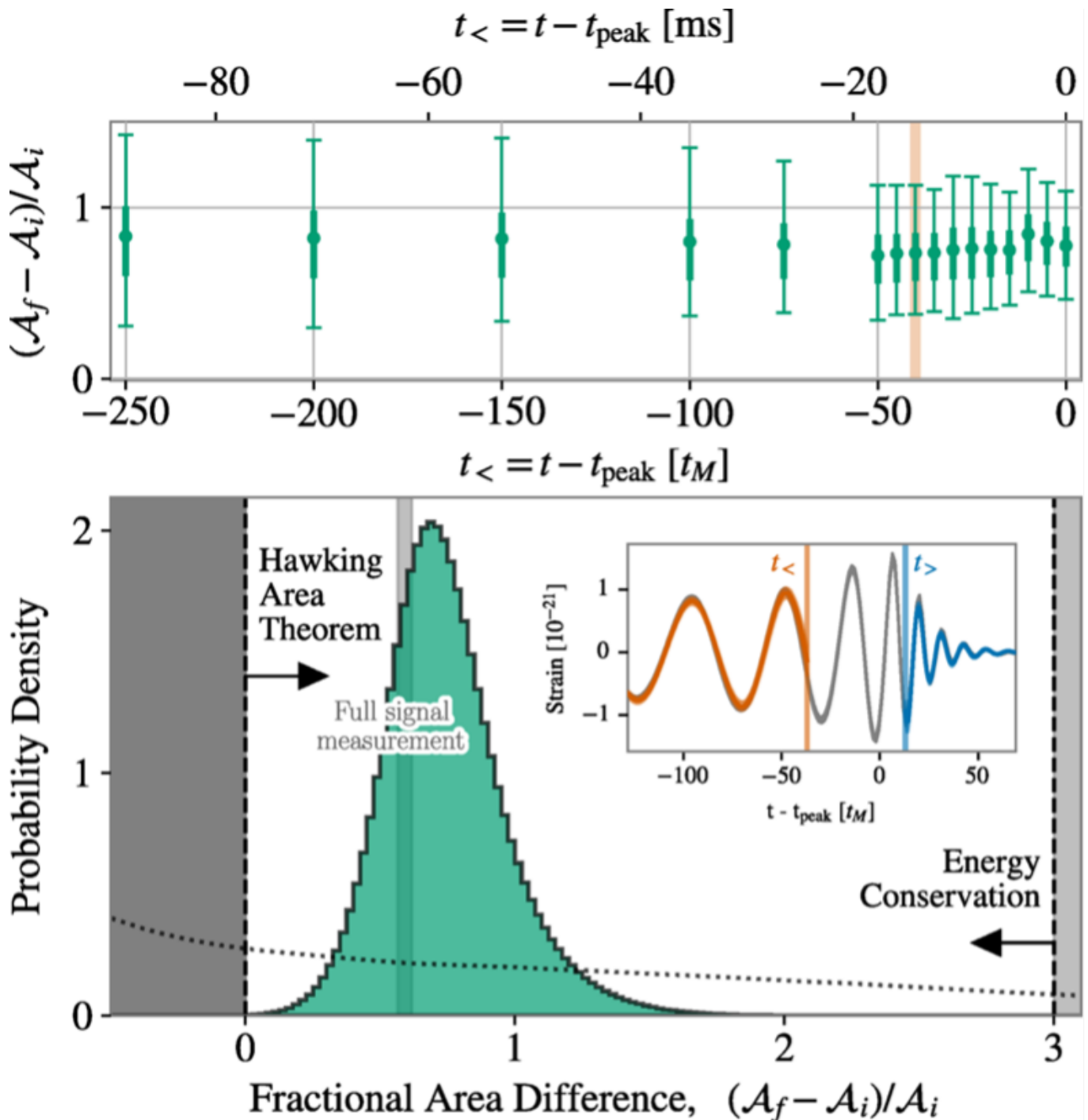
[samenwerkingsverband](#).

Zwarte gaten hebben maar weinig meetbare eigenschappen: de massa (M) , de lading (Q) en de draaiing (J) . Aangezien een zwart gat met grote lading snel materie zou aantrekken met de omgekeerde lading en daarmee zou neutraliseren, wordt voor sterrenkundige zwarte gaten vaak de zogeheten Kerr-metriek gebruikt: een [metriek](#) (een beschrijving van de kromming van de ruimte) die geldt voor zwarte gaten met alleen massa en draaiing. Het oppervlak van zo'n zwart gat kan berekend worden aan de hand van deze twee eigenschappen:

$$A = 8\pi \left(\frac{GM}{c^2}\right)^2 \left(1 + \sqrt{1 - J^2}\right)$$

De zwarte gaten die samensmelten zijn, lang voordat het zover is, beide goed te beschrijven aan de hand van de Kerr-metriek. Tijdens de samensmelting is het lastiger te beschrijven wat er precies gebeurt, maar een tijdje erna is het resulterende zwarte gat ook weer goed te beschrijven aan de hand van diezelfde Kerr-metriek en kan dus weer bovenstaande formule gebruikt worden.

Vanuit het signaal in afbeelding 2 kunnen wetenschappers afleiden wat de massa en draaiing van beide zwarte gaten was vóór de samensmelting en diezelfde eigenschappen bepalen van het uiteindelijke zwarte gat na de samensmelting, en hiermee worden de oppervlaktes dan berekend. Vanuit de theorie is er een minimum en een maximum aan het verwachte uiteindelijke oppervlak. Het minimum volgt uit Hawkings voorspelling, maar het proces moet natuurlijk ook voldoen aan energiebehoud. De totale massa van het uiteindelijke zwarte gat kan niet groter zijn dan de massa's van beide afzonderlijke zwarte gaten bij elkaar opgeteld, en omdat het oppervlak afhangt van de massa heeft ook dit een bovengrens.



Afbeelding 3. Relatief oppervlakteverschil. Het relatieve oppervlakteverschil heeft een theoretische onder- en bovengrens, en de gemeten data vormen een histogram. De verticale grijze lijn geeft aan waar de verwachte theoretische toename ligt, berekend vanuit de initiële massa en draaiing van de afzonderlijke zwarte gaten. Afbeelding uit het [artikel van het LVK-samenwerkingsverband](#).

In afbeelding 3 zijn de resultaten van het experiment te zien. De precieze meetwaarden in de eindtoestand hebben natuurlijk zelf ook weer een bepaalde onzekerheid, en dus zijn de

mogelijke eindoppervlakken weergegeven in een histogram. We zien om te beginnen dat dat hele histogram netjes tussen beide grenzen in ligt. Afhankelijk van hoeveel van het signaal wordt gebruikt, varieert de zekerheid waarmee wordt voldaan aan de oppervlaktewet van $3,4 \sigma$ (gemeten in [standdaarddeviaties](#); dit komt overeen met 99,93% zekerheid) tot meer dan 5σ (99,9999% zekerheid). Als meer van het signaal wordt meegenomen, dan valt daar dus ook meer van het samensmeltproces binnen, waarvan we dus minder zeker weten hoe dat in zijn werk gaat en waarvoor de aannames en formules minder goed gemotiveerd zijn. Maar als minder van het signaal wordt gebruikt, dan is het signaal minder sterk en zijn de berekende massa's en draaiingen minder accuraat. Hoe dan ook: zelfs als relatief weinig van het signaal wordt meegenomen, ligt de zekerheid waarmee aan de oppervlaktewet voldaan is dus nog vrij hoog.

Ter vergelijking: met de eerste gedetecteerde zwaartekrachtsgolf, GW15914, is een [vergelijkbare berekening](#) gedaan en daar werd met meer aannames een standaarddeviatie van 'maar' 2σ gevonden, wat overeenkomt met 95,45% zekerheid. Door de jaren heen is het experiment dus een stuk krachtiger geworden, en kan aan een vergelijkbare samensmelting de oppervlaktetoename met veel meer zekerheid worden gemeten! Als wat meer van het signaal wordt gebruikt, wordt de natuurkundige gouden standaard van 5σ dus zelfs gehaald. Na deze waarneming werd dan ook in vele nieuwsartikelen aangekondigd dat Hawkings oppervlakte-wet dan eindelijk was bevestigd. Natuurlijk geldt die 'zekerheid' wel nog maar voor één samensmelting, en zouden we in de toekomst graag hetzelfde meten bij zo veel mogelijk andere samensmeltingen om zo te kunnen zeggen dat de oppervlakte van een zwart gat inderdaad *altijd* toeneemt.

Kortom, in tien jaar kan een heel nieuw natuurkundig 'zintuig' onze kijk op het universum met sprongen verbeteren, en daarmee zelfs theoretische voorspellingen over onzichtbare objecten, zwarte gaten, bevestigen. Met de [Einsteintelecoop](#), die misschien wel in Nederland gebouwd gaat worden, zal die situatie waarschijnlijk nog vele malen beter worden. Welke nieuwe inzichten of bevestigingen van verwachtingen dat ons gaat opleveren, kan alleen de tijd ons leren.