

## De zonderlinge zaak van GW190814: het samensmelten van een zwart gat en een mysterieus compact object

Op 14 augustus 2019, op de dag af precies twee jaar na de eerste keer dat een zwaartekrachtsgolfsignaal door drie detectoren tegelijk werd gedaan, hebben de Advanced LIGO detectoren in de Verenigde Staten en de Advanced Virgo detector bij Pisa, Italië, opnieuw een zwaartekrachtsgolfsignaal gemeten die wellicht nóg bijzonderder is. De LIGO-Virgo detectoren waren bezig met hun derde observation run, O3, toen het zeer luide signaal gemeten werd: een zwaartekrachtsgolf gemaakt in de spiraalbeweging en samensmelting van twee compacte sterren. Eén ervan is een zwart gat, het andere is nu toe nog niet gedetermineerd.

Een analyse van het opmerkelijke signaal GW190814 is nu online gepubliceerd op de website arxiv.org.

Twee opvallende kenmerken maken de bron van GW190814 uniek. Ten eerste is het zwaardere object ongeveer negen keer meer massief dan zijn partner; hierdoor is dit dubbelsysteem het meest asymmetrische systeem dat tot nu toe met zwaartekrachtsgolven is waargenomen. Ten tweede is de massa van het lichtere object zodanig dat het ofwel het lichtste zwarte gat is dat ooit is waargenomen, ofwel de zwaarste neutronenster die ooit in een dubbelsysteem is gezien; we weten het niet zeker. Deze twee kenmerken tornen aan ons begrip van de massa die compacte objecten kunnen hebben en de manier waarop compacte objecten in dubbelsystemen opduiken.

### Zwaartekrachtsgolfsignaal

De zoektocht naar zwaartekrachtsgolfsignalen in de data maakt gebruik van de zogenaamde *matched filtering* techniek, waarin de data wordt vergeleken met de voorspellingen uit Einsteins Algemene Relativiteitstheorie. Deze analyse laat zien dat de kans dat GW190814 onterecht aangezien is als zwaartekrachtsgolfsignaal terwijl het eigenlijk ruis van de detector betrof, minder dan 1 op 10000 jaar is. GW190814 is het op twee na luidste event dat we tot dusver gemeten hebben (na GW170817 en GW150914). Het signaal is luid genoeg om met het blote oog te kunnen zien in het spectrogram van figuur 1, dat laat zien hoe de frequentie van het signaal verandert in de tijd.

Gedurende O3 heeft de LIGO-Virgo Collaboration in *real-time* public alerts uitgegeven van mogelijke zwaartekrachtsgolfsignalen. Deze *public alerts* bevatten de eerste gegevens van de meest waarschijnlijke bron van het signaal, geclassificeerd op basis van de bron. GW190814 werd 20 minuten na de detectie vrijgegeven met als classificatie 'Band Gap', waarmee bedoeld wordt dat de massa van één van de twee compacte objecten geschat wordt tussen drie en vijf keer die van de zon te zijn. Deze definitie van 'Mass Gap' komt voort uit het feit dat er nauwelijks zwarte gaten gemeten worden met een massa onder vijf zonsmassa's.

Verdere analyse van het signaal stond toe een preciezere schatting te maken van de massa's, en elf uur later werd er een update gecirculeerd waarin de classificatie veranderd was naar 'NSBH', waarmee bedoeld wordt dat de massa van één van de twee compacte objecten minder is dan drie zonsmassa's (wat een grove schatting is van de maximale massa van een neutronenster.)

Verder was vastgesteld dat de bron zich moet bevinden in een klein stukje hemeloppervlak van ongeveer 20 vierkante graad (zie Figuur 3). Met behulp van deze informatie werd er vervolgens gespeurd rond deze locatie gezocht naar elektromagnetische straling en neutrino's, maar deze zijn niet gevonden. Dit was niet geheel onverwacht, aangezien GW190814 veel verder weg staat dan GW170817 en omdat de eigenschappen van de bron geen sterk elektromagnetisch signaal voorspellen.

### Eigenschappen van de bron

De zwaardere van de twee compacte objecten in het dubbelsysteem heeft een massa van ongeveer 23 zonsmassa's, wat consistent is met de eerder gemeten populaties van zwarte gaten die door LIGO en Virgo gemeten zijn (zie Figuur 4). De massa van het lichtere object ligt tussen de 2.5 en 3 zonsmassa's, waardoor het zwaarder is dan de meest massieve

neutronenster die bekend is (MSP J0740+6620) maar lichter dan de zwarte gaten die (indirect) door elektromagnetische metingen waargenomen zijn. De massa van het lichtere object is echter vergelijkbaar met die van het compacte object (vermoedelijk een zwart gat) dat gevormd werd toen de twee neutronensterren van GW170817 samensmolten.

De asymmetrie van de twee compacte objecten helpen ons om de eigenschappen van het dubbelsysteem preciezer te meten. Hoe groter de asymmetrie, hoe sterker de 'boventonen' van de grondfrequentie voorkomen in het zwaartekrachtsgolfsignaal (vergelijkbaar met de boventonen van een gitaarsnaar). Net zoals het geval was in het dubbelsysteem GW190412, waarin de twee objecten eveneens ongelijke massa's hadden, helpen de boventonen om de informatie over de afstand tot de bron en inclinatie van elkaar te scheiden. We hebben daardoor kunnen vaststellen dat de zwaartekrachtsgolven van GW190814 op ongeveer 800 miljoen lichtjaar ontstaan zijn.

We verwachten dat compacte objecten zoals neutronensterren en zwarte gaten om hun eigen as draaien. Deze *spins* hebben niet zo'n grote invloed op het zwaartekrachtsgolfsignaal als de massa's, maar GW190814 was een langdurig signaal dat langer dan 16 seconden door onze detectors werden waargenomen. Dit, tezamen met de luidheid van het signaal, heeft ons in staat gesteld om de meest precieze meting te doen van de spin van een zwart gat: deze bleek slechts 7% lager te zijn dan de waarde die maximaal toegestaan is door de Algemene Relativiteitstheorie. We hebben ook kunnen vaststellen dat het dubbelsysteem waarschijnlijk geen precessie heeft.

## Einstein en Hubble getoetst

GW190814 stelt ons in staat veel wetenschap te doen. Aangezien GW190814 meer asymmetrisch is dan GW190412, is er stevig bewijs geleverd voor het bestaan van boventonen van de zwaartekrachtsgolven, Dit levert een prachtige overeenstemming op met de Algemene Relativiteitstheorie, die inderdaad deze boventonen voorspelt.

We hebben met GW190914 de Algemene Relativiteitstheorie ook op andere manieren kunnen toetsen en hebben gevonden dat het signaal goede overeenkomst heeft met het samensmelten van twee zwarte gaten. In het bijzonder is er geen aanwijzing gevonden dat het lichtere object iets *anders* zou kunnen zijn dan een zwart gat, zoals een neutronenster of iets exotischer.

Met GW190414 zijn we ook in staat geweest om een nieuwe meting te doen, louter op basis van zwaartekrachtsgolven, van de uitdijingsnelheid van het heelal (de zogenaamde *Hubble constante H*). GW190414 is tot op heden de best-gelocaliseerde bron van zwaartekrachtsgolven waarvan we geen elektromagnetisch signaal hebben gemeten. In principe vereist een meting van H dat we de roodverschuiving weten van het sterrenstelsel waarin de bron zich bevindt. Zonder een vergezellend elektromagnetisch signaal om het sterrenstelsel van de bron te identificeren, kunnen we gebruik maken van de andere sterrenstelsels in het gebiedje aan de hemel waar het signaal vandaan komt.

We gebruiken daartoe de roodverschuivingen van die andere sterrenstelsels, ieder gewogen door de kans dat dat het sterrenstelsel van de bron was, en vergelijken die met de meting van het zwaartekrachtsgolfsignaal. Deze meetmethode geeft ons de waarde van H met een hogere nauwkeurigheid dan eerder gevonden was aan de hand van andere bronnen waarvan geen elektromagnetisch signaal gemeten was. Deze uitkomst is gecombineerd met de metingen van de Hubble constante uit de vorige LIGO-Virgo observation runs, en levert een waarde op van ongeveer 69 km/s/Mpc (kilometer per seconde per Megaparsec), met een meetonauwkeurigheid van ongeveer 10 km/s/Mpc; dit is nauwkeuriger dan de vorige metingen van LIGO-Virgo, waar de onnauwkeurigheid ongeveer 12 km/s/Mpc was.)

## Is het lichtere compacte object een neutronenster of een zwart gat?

De massa van het lichtere van de twee objecten maakt dat dit ofwel een zeer zware neutronenster is, ofwel een ongewoon lichte neutronenster. Normaalgesproken herkennen we de aanwezigheid van een neutronenster aan de manier waarop getijdenkrachten de vorm van de zwaartekrachtsgolf beïnvloeden: in een dubbelsysteem waarin één van de compacte objecten een neutronenster is, zal de zwaartekracht ten gevolge van het andere compacte object getijden veroorzaken op de neutronenster, vergelijkbaar met de manier waarop de maan verantwoordelijk is voor eb en vloed in onze oceanen. In het geval van GW190814 waren deze getijden te klein om in het zwaartekrachtsgolfsignaal te meten. Een getijdenmeting heeft ons dus niet in staat gesteld om vast te stellen of GW190814 veroorzaakt werd door het samensmelten van een neutronenster met een zwart gat, of door het samensmelten van twee zwarte gaten.

Theoretische modellen, tezamen met astronomische metingen aan de populatie van neutronensterren, laten ons een afschatting maken van de hoogste waarde die de massa van een neutronenster kan hebben. Deze laten zien dat het lichtere van de twee compacte objecten waarschijnlijk te zwaar is om een neutronenster te zijn, en dat het aannemelijker is dat het een zwart gat betreft. Helemaal uitsluiten dat het toch een neutronenster is kunnen we niet; als dat het geval blijkt te zijn zullen de theoretische modellen flink op de schop moeten.

## Hoe is dit systeem gevormd?

Aangezien de massa van het lichtere object tussen de verwachte waarden van neutronensterren en zwarte gaten ligt, én omdat de massa negen keer kleiner is dan die van zijn partner, lijkt GW190814 niet op de signalen die tot dusver door LIGO en Virgo opgevangen zijn. Ook komt GW190814 niet voor in de theoretische simulaties van dubbelsystemen. We verwachten dat zulke samensmeltingen veel minder vaak voorkomen dan de typische samensmeltingen van twee zwarte gaten of twee neutronensterren. Om deze redenen is het erg moeilijk om te verklaren hoe dit dubbelsysteem gevormd kan zijn.

Als we de eigenschappen en de *merger rate* van GW190814 vergelijken met de voorspellingen op basis van theoretische modellen van sterevoluties, vinden we dat jonge clusters van sterren en schijven rond actieve kernen van sterrenstelsel waarschijnlijker zijn als broedgebied voor zulke events dan *globular clusters*. Het lijkt ook onwaarschijnlijk dat dit event gevormd is uit een geïsoleerd dubbelsysteem. Het is echter mogelijk dat het lichtere object in het dubbelsysteem gevormd is in een eerdere samensmelting, en daarna via zwaartekracht zijn zwaardere partner aan zich gebonden heeft in een dichtbevolkt gebied zoals globular cluster. Het is echter niet erg waarschijnlijk dat dit het belangrijkste mechanisme is waarmee zulke dubbelsystemen gevormd worden.

GW190814 roept fascinerende vragen op over de massa van compacte objecten en de processen die leiden tot hun samensmeltingen. Nieuwe toekomstige zwaartekrachtsgolfdetecties zijn van groot belang om meer licht (of zwaartekrachtsgolven!) te werpen op de zulke samensmeltingen, waarvan GW190814 slechts het eerste voorbeeld is.

## Overzicht

**Compact Object:** objecten met zeer hoge dichtheid, zoals witte dwergen, neutronensterren en zwarte gaten, die typisch het eindstation zijn van de levenscyclus van een ster.

**Zwart gat:** Een compact object waarvan de dichtheid zo hoog is dat licht niet aan de zwaartekracht kan ontsnappen.

**Neutronenster:** Een compact object met extreem hoge dichtheid, dat typisch overblijft na het ineenstorten van een massieve ster.

**$M_{\odot}$ :** De massa van de zon, wat een standaardeenheid is in de sterrenkunde. De waarde is ongeveer  $2 \times 10^{30}$  kg

**Mass-gap:** de afwezigheid van metingen van zwarte gaten van massa's tussen 2.5 en 5 zonsmassa's.

**Boventonen:** zwaartekrachtsgolven kunnen worden beschreven als een gewogen som van sferisch harmonischen. De boventonen zijn termen in deze som die kleiner zijn dan de grondtoon.

**Precessie:** de draaiing van het vlak rond de impulsmomentvector. Precessie treedt op wanneer de spin-vectoren van de compacte objecten in een andere richting wijzen dan de impulsmomentvector van het dubbelsysteem.

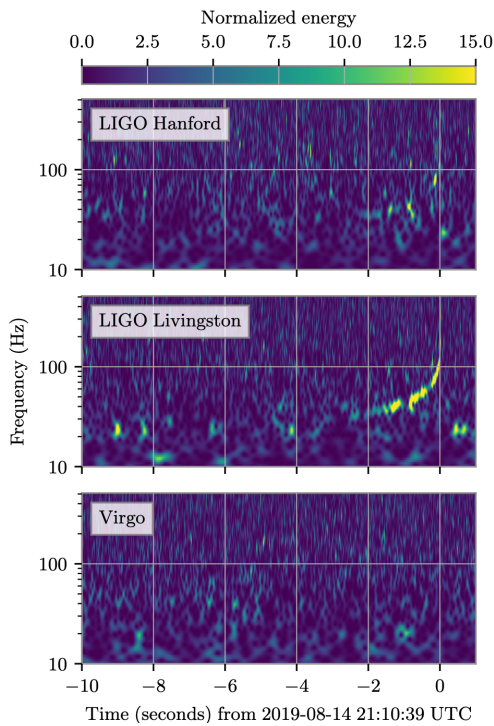
**Lichtjaar:** afstandsmaat gedefinieerd als de afstand die het licht aflegt in één jaar tijd.

**Megaparsec (Mpc):** eenheid van afstand, gelijk aan ongeveer 2.36 lichtjaar.

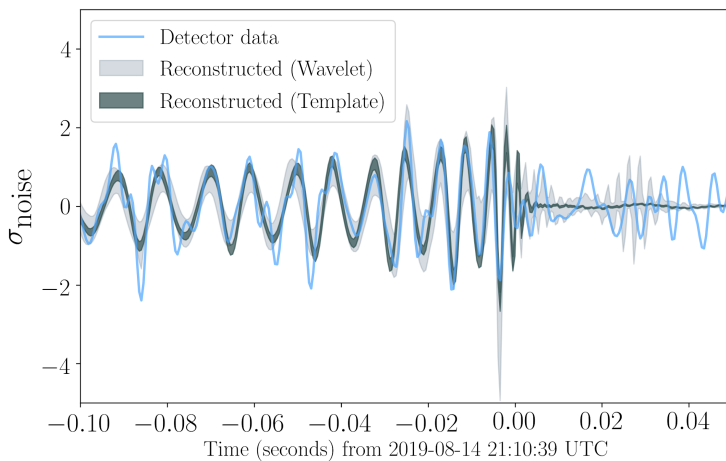
**Roodverschuiving:** toename van de golflengte (van geluid, licht, of zwaartekrachtsgolven) ten gevolge van de relatieve snelheid tussen de bron en de waarnemer. Door de uitdijng van het heelal zullen objecten zoals sterrenstelsels zich van ons af bewegen en zal hun uitgezonden licht (en andere elektromagnetische straling) een hogere golflengte hebben.

**Globular cluster:** een bolvormige verzameling van sterren, die in gesloten banen rond een sterrenstelsel bewegen. Een globular cluster kan tot een miljoen sterren bevatten.

**Active galactic nuclei:** Zeer compacte en lumineuze gebieden in de centra van een aantal sterrenstelsels. Zij behoren tot de meest krachtige stabiele bronnen van energie in het universum.

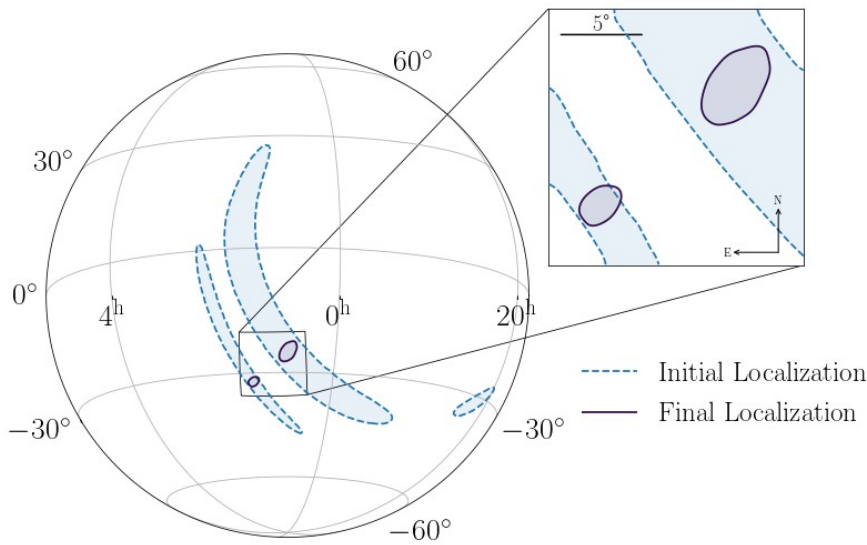


Figuur 1: Tijd-frequentie grafieken van de data waarin het signaal van GW190814 zich bevindt, zoals gemeten door LIGO Hanford (boven), LIGO Livingston (midden), en Virgo (beneden). Tijd is weergegeven vanaf ongeveer 10 seconden vóór het event. De kleur geeft de energie aan. Een ‘chirp signal’ is met het oog duidelijk zichtbaar in de middelste grafiek (data van LIGO Livingston), waar het signaal het luidst was.

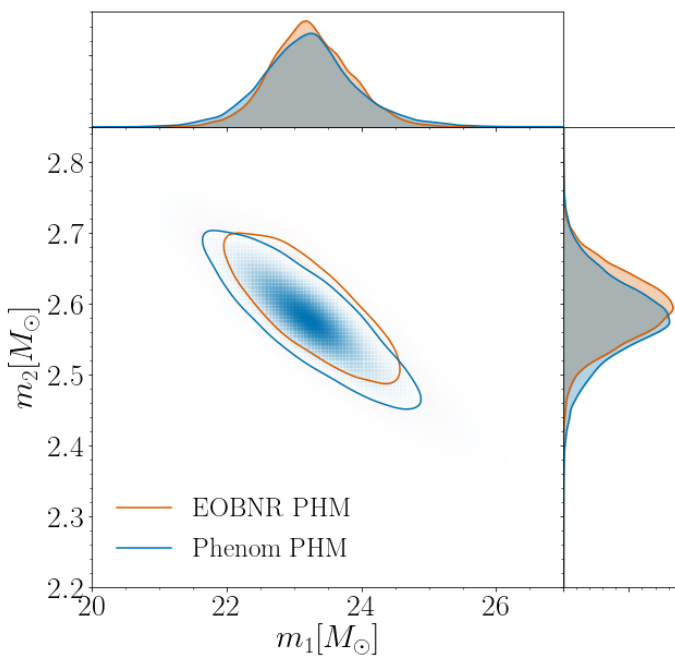


Figuur 2: Grafiek van de daadwerkelijke detector data (blauw) rondom het tijdstip (horizontale as) van het event, tezamen met de theoretische voorspelling van dit signaal, zoals die voorspeld wordt door de Algemene Relativiteitstheorie. De lichtgrijze band toont de voorspelling van de Algemene Relativiteitstheorie; de donkergrijze band toont de voorspelling van het signaal voor andere theorieën van zwaartekracht onder minimale aannames waar zwaartekrachtstheorieën aan moeten voldoen.

De verticale as is zodanig geschaald dat een waarde van 1 overeenkomt met de typische waarde van de ruisfluctuaties in de data.



Figuur 3: Het oppervlak aan de hemelbol waar GW190814 waarschijnlijk zijn oorsprong heeft. De blauwe gebiedjes geven de eerste voorspelling aan op basis van de data; de paarse gebiedjes geven de uiteindelijke locatie aan.



Figuur 4: De massa's van de twee compacte objecten in GW190814. De horizontale as geeft de massa van het zwaardere object aan, waar de verticale as de massa van het lichtere object (dat een zwart gat of een neutronenster zou kunnen zijn) aangeeft. De contouren en gearceerde gebieden laten de mogelijke combinaties van waarden van de massa's zien die overeenkomen met de data. De krommen in de aanliggende panels (boven en rechts) tonen de kansverdelingen aan van de afzonderlijke massa's. De twee kleuren onderscheiden twee ietwat verschillende voorspellingen van het signaal op basis van de Algemene Relativiteitstheorie.