

# GW190412: DE EERSTE DETECTIE VAN DE SAMENSMELTING VAN TWEE ZWARTE GATEN MET ONGELIJKE MASSA'S

## WAT HEBBEN WE GEZIEN?

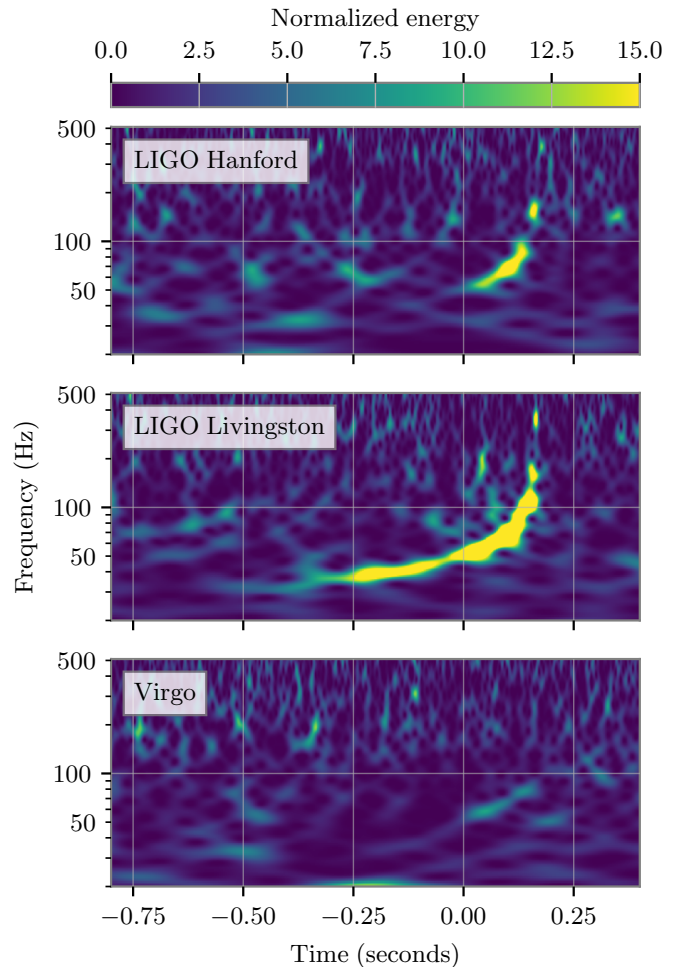
Op April 12, 2019, zagen het [LIGO](#) en [Virgo](#) consortium zwaartekrachtsgolven ontstaan tijdens de botsing en samensmelting van twee zwarte gaten. Dit event, genaamd GW190412, is gedetecteerd door alle drie de detectoren in 's werelds netwerk: beide [LIGO](#) detectors (één in [Hanford, Washington](#) de ander in [Livingston, Louisiana](#)) en de [Virgo detector](#) (Cascina, Italië). GW190412 dook op in de data aan het begin van Advanced LIGO en Virgo's derde meetperiode, bekend als O3. Deze meetperiode begon 1 april 2019 en eindigde op 27 maart 2020.

Hoewel de gemeten massa's van de zwarte gaten consistent zijn met eerdere metingen, is GW190412 uniek door het feit dat in deze meting de massa's van de zwarte gaten definitief ongelijk zijn — het ene zwarte gat is driemaal zo zwaar als zijn compagnon. Het zwaartekrachtsgolfsignaal wordt door dit feit in een dusdanige manier beïnvloed dat we andere parameters, zoals de afstand en inclinatie van de bron, de spin van het zwaarste zwarte gat, en de hoeveelheid precessie van het systeem beter kunnen meten. Ook stelt het massaverschil ons in staat om een fundamentele voorspelling van de Algemene Relativiteitstheorie van Albert Einstein te onderzoeken: zwaartekrachtsgolven trillen bij meer dan één frequentie tegelijk, de zogenaamde hogere orde *multipoles*.

## HOE WETEN WE DAT GW190412 EEN ECHT ZWAARTEKRACHTSGOLFSIGNAAL IS?

GW190412 is een luide gebeurtenis dat in alle drie de detectoren *gehoord* werd. Omdat de drie detectoren duizenden kilometers van elkaar verwijderd zijn, is het bijna gelijktijdig zien van het signaal een goed teken dat het een astrofysische oorsprong heeft en niet gewoon ruis is.

De tijd-frequentie representatie, bekend als een *spectrogram*, ziet u in Figuur 1. Hoewel GW190412 sterk genoeg is om "met het blote oog" in de data van de Hanford en Livingston detectors te zien, gebruiken we verscheidene algoritmes om systematisch de data te scannen voor zwaartekrachtsgolven. Zo bepalen we de statistische significantie van het signaal. De meeste van deze technieken gaan uit van *matched filtering*, welke de geobserveerde data vergelijkt met gesimuleerde signalen berekend uit de Algemene Relativiteitstheorie. We kwantificeren de kans dat een signaal voortkomt uit de detectorruis als de *kans op vals-alarm*. Met data van 8 tot 18 april konden we een vals-alarm kans bepalen van één per 30.000 jaar! Deze kans op een vals alarm zal, wanneer we nog meer O3 data analyseren, nog kleiner worden. We hebben ook allerlei andere checks van bijvoorbeeld instrumentele of omgevingsruis gedaan en hieruit vonden we niets dat een significante invloed op de detectie of analyse van GW190412 heeft.



**Figuur 1:** Het spectrogram van GW190412 in alle drie de zwaartekrachtsgolfdetectoren. Op de horizontale as vindt u tijd en op de verticale as de frequentie van het signaal. De kleur is een maat voor het vermogen bij een bepaalde frequentie op een bepaalde tijd. De nu beroemde "chirp" kan ook bij dit signaal gezien worden als een hoger wordende frequentie naarmate de tijd verstrijkt. Dit is een gevolg van een steeds groter vermogen in zwaartekrachtsgolven omdat de twee zwart gaten elkaar steeds dichter en dichter naderen (de zogenaamde "inspiral") en daaropvolgend samensmelten.

Ga naar onze websites:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



## EIGENSCHAPPEN VAN GW190412

De individuele massa's van de twee zwarte gaten in GW190412 komen overeen met wat is waargenomen bij eerdere waarnemingsruns - het ene zwarte gat heeft ongeveer 30 keer en het andere ongeveer 8 keer de massa van de zon. De massaverhouding van deze gebeurtenis, gedefinieerd als de verhouding tussen de lichtere en zwaardere zwarte gat, is anders dan alle andere samensmeltingen van zwarte gaten die we eerder hebben gezien. In alle 10 zwarte gaten samensmeltingen van de eerste twee meetperiodes waren beide zwarte gaten in elk systeem ongeveer gelijk in massa.

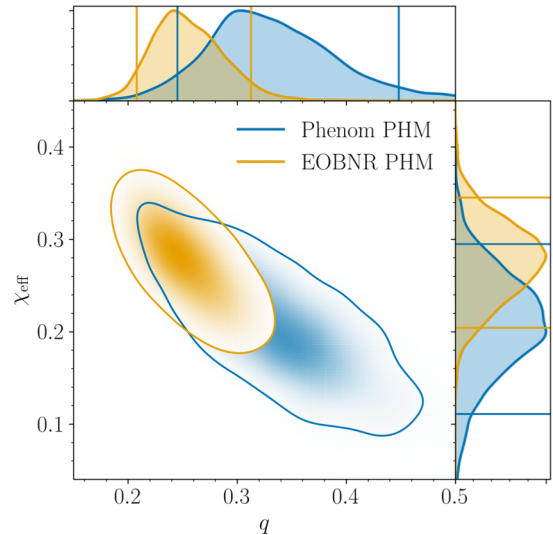
De ongelijke massa's van GW190412 leiden tot een asymmetrie in de zwaartekrachtsgolfemissie die ons helpt bepaalde parameters van het systeem beter te bepalen. We vinden dat de effectieve spin positief is, wat ons vertelt dat ten minste één van de zwarte gaten ronddraait in een oriëntatie dicht bij de baan van de twee zwarte gaten om elkaar heen. Met name vanwege de ongelijke massa's kunnen we voor het eerst sterke beperkingen opleggen aan de spin van het grotere zwarte gat, waarvan we vinden dat het draait op ongeveer 40% van de maximale spin die is toegestaan door de Algemene Relativiteitstheorie. De effectieve spin- en massaverhouding wordt weergegeven in figuur 2. We zien ook hints dat het systeem aan het precederen is, hoewel de effecten van precessie niet sterk genoeg zijn om definitief te worden geclaimd. Bovendien helpen de ongelijke massa's ook om een dubbelzinnigheid tussen de afstand en de inclinatie van het systeem te doorbreken, waardoor beide parameters beter kunnen worden gemeten. Deze gebeurtenis vond 2,5 miljard jaar geleden plaats op evenzoveel lichtjaar afstand van de aarde!

## HOOR DE ZOEM VAN DE BOVENTONEN

De unieke eigenschappen van GW190412 maken het ook mogelijk om een fundamentele eigenschap van gravitatiegolven te observeren. Beginnend met het baanbrekende werk van Einstein, en later verfijnd door Newman, Penrose, Thorne en vele anderen, bleek de zwaartekrachtstraling van compacte binaire systemen overwegend quadrupolair te zijn. Deze quadrupolaire straling kan worden gezien als het hoofdgeluid dat wordt gehoord bij het plukken van een snaar op een gitaar. Echter, net als bij muziekinstrumenten, wordt voorspeld dat gravitatiestraling ook zal klinken bij hogere boventonen. Deze boventonen of hogere multipolen zijn bijzonder moeilijk te ontleden uit een signaal wanneer de zwarte gaten bijna even zwaar zijn. De asymmetrische massaverhouding zorgt ervoor dat deze subtiele signalen beter worden *gehoord* in de zwaartekrachtsgolfemissie. We vinden dat de gegevens de hypothese ondersteunen, met een factor groter dan 1000:1, dat er boventonen in het signaal zijn. In de toekomst kan de relatieve intensiteit van hogere multipolen helpen om de eigenschappen van zwarte gaten beter te ontrafelen. Een uitgebreide analyse van de data toont aan dat ook deze gebeurtenis, waarbij extreem sterke zwaartekrachtsvelden betrokken waren, volledig consistent blijkt te zijn met Einstein's theorie.

## WAAR KOMEN DEZE ONGELIJKE PAREN VANDAAN?

Elke observatie van het Advanced LIGO- en Virgo-netwerk heeft nieuwe en opwindende inzichten opgeleverd in de dierenwereld van compacte binaire systemen. Als het eerste binaire systeem met zwart gaten met definitief ongelijke massa's, biedt GW190412 een belangrijk datapunt in ons begrip van binaire eigenschappen van de populatie van zwart gaten. De waarneming van deze enkele gebeurtenis vertelt ons dat deze systemen met ongelijke massa's relatief vaak voorkomen en dat we in de toekomst veel meer van dergelijke systemen zouden kunnen waarnemen. Gebaseerd op de gedetailleerde fysica van stellaire evolutie, hebben astronomen modellen gebouwd van hoe binaire zwarte gaten zich vormen in het universum, en van hun verwachte massa's en andere eigenschappen. Hoewel de meeste modellen voorspellen dat binaire bestanden met bijna gelijke massa's vaker zouden moeten voorkomen, voorspellen velen ook een aanzienlijk aantal systemen met duidelijk ongelijke massa's. Dergelijke systemen zullen doorgaans minstens tien keer minder vaak worden gevormd dan hun tegenhangers met gelijke massa. De waarneming met zijn schijnbaar extreme massaverhouding is echter niet onverwacht, aangezien we nu meer dan 10 gebeurtenissen hebben gedetecteerd. Omdat we doorgaan met het vergroten van onze gevoeligheid voor de zwaartekrachtsgolven en bouwen een snel groeiende catalogus van compacte binaire samensmeltingen, verwachten we veel meer systemen te observeren die onze kijk op evolutie van de sterren, compacte binaire vorming en fundamentele fysica beter verlichten.



**Figuur 2:** De bepaalde ratio tussen de massa's ( $q$ ) en de effectieve spin ( $\chi_{\text{eff}}$ ) van GW190412. De oranje en blauwe contouren laten de distributies van deze twee parameters zien door twee verschillende golfvormmodellen. Deze modellen maken elk enigszins verschillende benadering om het ware signaal uit de Algemene Relativiteitstheorie te modelleren.

## TERMINOLOGIE

**Zwart gat:** een object dat zo compact is dat zelfs licht niet aan zijn aantrekkingskracht kan ontsnappen.

**Compact binair systeem:** een systeem gemaakt van twee compacte stellaire restanten, b.v. neutronensterren of zwarte gaten.

**Spin:** een parameter die aangeeft hoeveel een object rondtoelt, om zijn as draait.

**Effectieve spin:** de best gemeten parameter die spininformatie weergeeft in een zwaartekrachtsgolfsignaal. Formeel is het een massa-gewogen projectie van de individuele zwart gat spins in de richting van de baan van de twee zwarte gaten.

**Algemene Relativiteitstheorie:** de zwaartekrachttheorie die Albert Einstein in 1915 voorstelde. In deze theorie is ruimte als een smeedbaar weefsel dat buigt in aanwezigheid van materie en energie, en objecten volgen trajecten door deze gebogen ruimte.

**Hogere multipolen:** Emissie door gravitatiegolven kan worden omschreven als een uitbreiding van 'sferische boventonen'. Hogere multipolen zijn termen in deze uitbreiding voorbij de dominante, quadrupolaire term.

**Inclinatie:** de helling van de zwarte gaten in een baan ten opzichte van de aarde.

**Matched Filtering:** Een techniek om signalen te detecteren die begraven liggen in data vol ruis. Sjablonen van gravitatiegolvormen die zijn berekend op basis van algemene relativiteit, worden over de gegevens gescand en gaan over wanneer er overeenkomende patronen in de gegevens worden gevonden.

**Precessie:** Als gevolg van het behoud van impulsmoment, wanneer zwarte gaten in een andere richting draaien dan de baan van het binaire systeem, zal het vlak van de baan roteren rond de richting van het totale impulsmoment.

**Quadrupool:** de sterkste van de multipolen voor zwaartekrachtsgolfemissie van een compact binair systeem. Als de golven kunnen beschouwd worden als de "geluiden van ruimtetijd", is de vierpolige emissie de fundamentele toon. De naam verwijst naar het emissiepatroon: ter vergelijking zendt een eenvoudige radioantenne de sterkste signalen in een dipool-patroon.

**Spectrogram:** een grafische weergave waarin wordt aangegeven hoeveel vermogen op ieder tijdstip en bij iedere frequentie aanwezig is.

**Golfvorm:** een theoretisch zwaartekrachtsgolfsignaal dat wordt geproduceerd met behulp van benaderingen van de algemene relativiteit van Einstein.