

# GW190521: DE MEEST MASSIEVE BOTSING VAN ZWARTE GATEN DIE TOT DUSVER GEMETEN IS

## Wat hebben we waargenomen?

Op 21 Mei 2019 observeerden de [Advanced LIGO](#) en [Advanced Virgo](#) detectoren het zwaartekrachtsgolfsignaal van de samensmelting van een bijzonder paar [zwarte gaten](#). Het signaal, genaamd GW190521, was van kortere duur en had zijn piek bij een lagere [frequentie](#) dan alle eerder gemeten samensmeltingen van zwarte gaten.

De tijdsduur die een signaal doorbrengt in het meetbare bereik van Advanced LIGO en Advanced Virgo is omgekeerd evenredig met de totale massa van een dubbelsysteem van zwarte gaten. In het geval van GW190521 was deze tijdsduur slechts 0.1 seconde, wat veel korter is dan bijvoorbeeld [GW150914](#) -de eerste zwaartekrachtsgolfmeting van een samensmelting die ooit gedaan is. Ook de maximale frequentie van zo'n signaal is omgekeerd evenredig met de totale massa. Voor GW190521 was deze frequentie slechts 60 Hz, opnieuw veel lager dan bij GW150914. Het was daarom meteen duidelijk dat LIGO en Virgo zeer massieve zwarte gaten hadden gemeten (zie fig 1).

Figuur 2 toont de gemeten waarden van de massa's van de zwarte gaten die verantwoordelijk waren voor GW190521. De zwaardere van deze twee bleek ongeveer 85 keer de [massa van de zon](#) (weergegeven met het symbool  $M_{\odot}$ ) te hebben, waar de lichtere een massa nabij  $66 M_{\odot}$  heeft. Beide zwarte gaten zijn veel zwaarder dan [alle zwarte gaten eerder waargenomen door LIGO en Virgo](#) die overblijven nadat zwarte gaten samengesmolten zijn (zie figuur 3).

Na de samensmelting bleef er een zwart gat over met een massa van  $142 M_{\odot}$ , en is daarmee met voorsprong het zwaarste zwarte gat dat door LIGO en Virgo gemeten is. Het overgebleven zwarte gat heeft ongeveer  $8 M_{\odot}$  minder massa dan de twee oorspronkelijke zwarte gaten; het verschil in massa is omgezet in de energie van de zwaartekrachtsgolf.

## Waarom is GW190512 zo interessant?

De enorm grote massawaarden van GW190521 zijn niet alleen interessant als recordhouders; zij tornen aan ons begrip van het ontstaansproces van zwarte gaten en geven ons een uniek laboratorium waarin wij kunnen onderzoeken hoe zwaartekracht werkt.



Zie onze websites:

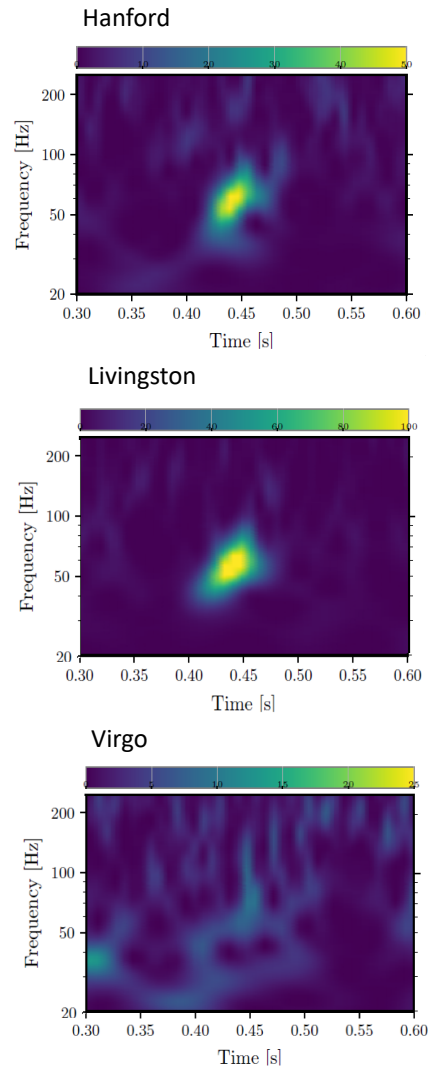
<http://www.ligo.org>

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

## Grote zwarte gaten maken

Astronomen classificeren zwarte gaten aan de hand van massa. Dit is zinnig omdat zwarte gaten aan de twee uiteinden van dit spectrum op heel verschillende manieren gevormd worden.

In het centrum van de meeste, of misschien zelfs alle, sterrenstelsels vinden we de 'supermassieve' zwarte gaten, die massa's hebben van honderdduizenden tot miljarden die van de zon.



**Figure 1.** De frequentie van de data waarin GW190521 verschoven is, als functie van de tijd. Boven is de waarneming gedaan door LIGO Hanford, midden door LIGO Livingston, onder door Virgo. De tijdstippen zijn ten opzichte van 03:02:29 UTC op 21 Mei 2019. De kleur geeft de energie aan die bij de betreffende frequentie gemeten is. Te zien is de korte duur van het signaal, en dat de hoogste frequentie gemeten is bij 60 Hz.

(Uit: Fig. 1 van ons [GW190521 discovery paper](#))

In het centrum van onze eigen Melkweg bevindt zich er een zwart gat dat ongeveer vier miljoen keer massiever is dan de zon. Precies hoe zulke grote zwarte gaten ontstaan is gedeeltelijk nog een mysterie. Het is waarschijnlijk dat hun ontstaansproces begon toen het Universum nog erg jong was, zodat de zwarte gaten genoeg tijd hebben gehad om voldoende te groeien.

Aan het andere eind van het massa-spectrum vinden we de 'stellar mass' zwarte gaten, waarvan vermoed wordt dat die ontstaan bij de ineenstorting van de kernen van zware sterren in de zogenaamde supernovas. Stellar mass zwarte gaten hebben massa's van enkele tot tientallen zonsmassa's, en het samensmelten van zulke zwarte gaten zijn precies de signalen die we meten met LIGO en Virgo.

Tussen de supermassive- en stellar mass zwarte gaten vinden we de mysterieuze 'intermediaire' zwarte gaten, die massa's hebben van honderden tot honderdduizenden zonsmassa's. Er is nog geen definitieve waarneming geweest van intermediaire zwarte gaten, maar er bestaan verschillende scenario's die verklaren hoe zij gevormd kunnen worden. De zoektocht naar intermediaire zwarte gaten krijgt steeds meer aandacht, aangezien de zwaartekrachtsgolfdetectoren steeds nauwkeuriger worden.

Gebaseerd op ons begrip van welke processen er plaatsvinden binnenin sterren en van hoe zwarte gaten gevormd worden, vermoeden we dat zwarte gaten van 65 tot 130 zonsmassa's niet kunnen ontstaan uit het ineenstorten van sterren. GW190521 is een bijzonder geval, omdat de zwaardere van de twee oorspronkelijke zwarte gaten een massa heeft waarvan niet wordt verwacht dat deze direct door het ineenstorten van een ster gevormd kan zijn. Daarnaast kan het resulterende zwart gat geclassificeerd worden als een intermediair zwart gat.

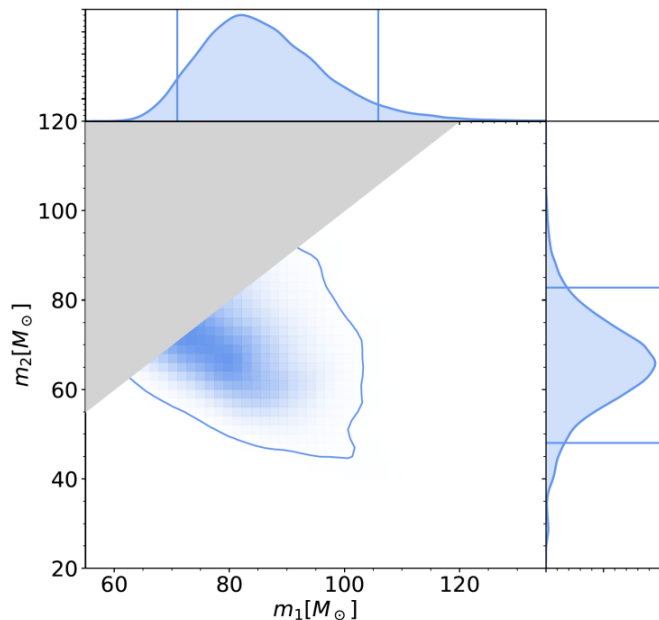
LIGO-Virgo's waarneming van GW190521 suggereert óf dat sterren wel degelijk zwarte gaten van hoge massa kunnen produceren, óf dat zwarte gaten gevormd worden door een ander proces -mogelijk als het gevolg van een eerdere samensmelting van kleinere zwarte gaten dat daarna een tweede samensmelting ondergaan heeft. Dit scenario vereist dat zwarte gaten gevormd worden in speciale omstandigheden waar er genoeg andere zwarte gaten in de buurt zijn om opeenvolgende samensmeltingen mogelijk te maken. Astronomen hebben sterrenclusters van hoge dichtheid en de materie rond active galactic nuclei voorgesteld als voorbeelden van zulke speciale omstandigheden.

De waarneming van GW190521 suggereert eveneens dat intermediaire zwarte gaten zouden kunnen bestaan uit de overgebleven zwarte gaten van eerdere samensmeltingen van stellar mass zwarte gaten. Ook supermassive zwarte gaten zouden mogelijk op deze manier zijn gevormd.

## Testing our Understanding of Gravity

Ons theoretische begrip van zwaartekracht wordt goed beschreven door Einsteins Algemene Relativiteitstheorie (ART). Natuurkundigen gebruiken ART om de zwaartekrachtsgolven te voorspellen die door samensmeltingen van zwarte gaten uitgezonden worden. Deze voorspellingen worden gebruikt om de meetdata van LIGO en Virgo te analyseren. De zwaartekrachtsgolfsignalen kunnen worden gebruikt om de voorspellingen zélf te toetsen, en zo te zoeken naar aanwijzingen dat er alternatieve zwaartekrachtstheorieën zouden kunnen zijn.

Het gebruik van zwaartekrachtsgolven als laboratorium van de natuurkunde zélf is niet nieuw: LIGO-Virgo's eerdere waarnemingen van samensmeltingen van zwarte gaten zijn gebruikt om ons begrip van ART te toetsen. Wat maakt GW190521 dan uniek?

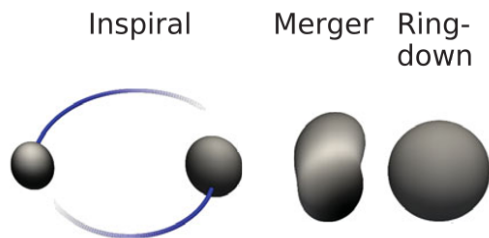


Figuur 2.

Gemeten waarden van de massa's van de twee samensmeltingen van zwarte gaten die het signaal GW190521 geproduceerd hebben, weergegeven als waarschijnlijkheidsverdeling. De analyse van LIGO-Virgo wijst uit dat het 90% waarschijnlijk is dat de werkelijke waarden van de massa's van de zwarte gaten zich bevinden binnen de ononderbroken blauwe contour van de middelste plot van deze figuur. De twee plots aan de randen van de middelste figuur geven dezelfde 90% waarschijnlijkheid aan voor elk van de massa's afzonderlijk. Deze middelste plot geeft de gemeenschappelijke waarschijnlijkheid voor beide massa's weer. Het grijze vlak is het gevolg van de conventie dat met  $m_1$  de hoogste van de twee massa's wordt bedoeld, en met  $m_2$  de laagste.

Een zwaartekrachtsgolfsignaal ten gevolge van de samensmelting van twee zwarte gaten ondergaat drie verschillende fasen (zie figuur 4): allereerst is er de 'inspiral' fase, waarin de zwarte gaten nog op grote afstand rond elkaar draaien; deze fase wordt gevolgd door de 'merger' fase, waarin de zwarte gaten samensmelten tot één resulterend zwart gat; tenslotte is er de 'ringdown' fase waarin het resulterende zwarte gat, als de bel in een klokkentoren die geslagen heeft, nog even nagalmt.

Zoals al eerder is opgemerkt bepalen de massa's van de twee zwarte gaten hoe lang een zwaartekrachtsgolfsignaal zich in het meetbare bereik van de LIGO-en Virgo detectoren bevindt, en wat de waarde is van de hoogst behaalde frequentie. De detectoren zijn hierdoor gevoelig voor verschillende fasen van het zwaartekrachtsgolfsignaal, afhankelijk van de massa. Van het signaal van een systeem van twee lichte zwarte gaten zal voornamelijk de inspiral fase in het meetbare bereik van de detector liggen. Aan de andere kant zullen de hele hoge massa's van het systeem dat GW190521 geproduceerd heeft ons de kans geven om de merger- en ringdown fase van het zwaartekrachtsgolf te meten.



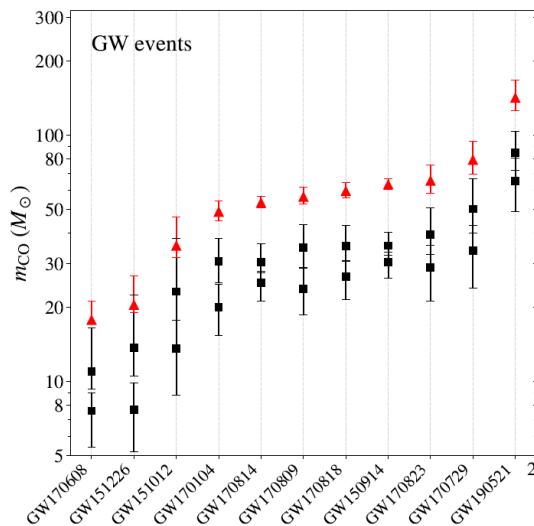
**Figure 4.** Schematische weergave van de drie fasen die doorlopen worden door een zwaartekrachtsgolf ten gevolge van de samensmelting van zwarte gaten.

De Algemene Relativiteitstheorie heeft, net als in alle voorgaande zwaartekrachtsgolfsignalen, de toets doorstaan: GW190521 bleek prima door ART beschreven te worden. Eén test die gedaan is, was om de merger fase en inspiral- en ringdown fase onafhankelijk van elkaar te analyseren en de resultaten te vergelijken. Ook is er in het signaal gezocht naar kenmerkende eigenschappen van andere zwaartekrachts-theorieën, en is er onderzocht of het signaal door een ander proces dan de samensmelting van zwarte gaten verklaard kon worden. Geen van deze tests heeft de conclusie onderuit kunnen halen dat GW190521 het gevolg was van de samensmelting van twee zwarte gaten, zoals voorspeld door de Algemene Relativiteitstheorie.

## Samenvatting:

GW190521 is een zwaartekrachtsgolfsignaal dat records gebroken heeft, ons begrip van de vorming van zwarte gaten heeft vergroot, en ons een nieuwe manier biedt om zwaartekracht te bestuderen in haar meest extreme vorm. Ook wijst dit signaal op het bestaan van samensmeltingen van zware zwarte gaten, die ontdekt kunnen worden in toekomstige metingen van de LIGO en Virgo detectoren.

GW190521 kan voorlopig even genieten van zijn recordstatus als zwaarste stel zwarte gaten ooit gemeten, maar moet er maar niet te veel aan wennen: LIGO en Virgo zoeken met steeds hogere nauwkeurigheid naar zwaartekrachtsgolven, en toekomstige detectoren zullen zeer gevoelig zijn voor de lage frequenties waar nog veel meer zware zwarte gaten verwacht worden zichtbaar te zijn. Onder de geplande detectoren van de toekomst vinden we de Einstein Telescope en de Cosmic Explorer, beide op aarde, en LISA in de ruimte. Records zijn er om gebroken te worden!



**Figuur 3.** Weergave van de twee massa's (weergegeven als zwarte vierkantjes) van de zwarte gaten in GW190521 en die van de andere gemeten samensmeltingen die gemeten zijn in de eerste en tweede observatie run van LIGO en Virgo. Van elke meting is ook de massa van het resulterende zwarte gat weergegeven (weergegeven als rode driehoekjes). In alle gevallen geeft de lengte van de verticale steep de onzekerheid aan van de betreffende meetwaarde. De record-brekende hoge waarden van GW150921 zijn duidelijk zichtbaar. (Uit ons artikel: [astrophysical implications of GW190521](#))

### VERDER LEZEN:

Zie onze websites: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

Lees onze persuitgaven over GW190521:  
[www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf](http://www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf)  
<http://www.virgo-gw.eu/GW190521>

Lees het volledige wetenschappelijke artikel over de ontdekking van GW190521:  
<https://dcc.ligo.org/P2000020/public>

Lees het begeleidende wetenschappelijke artikel over de astrofysische gevolgen van GW190521:  
<https://dcc.ligo.org/P2000021/public>

Link naar het Gravitational-Wave Open Science Centre data voor GW190521: [hier](#)