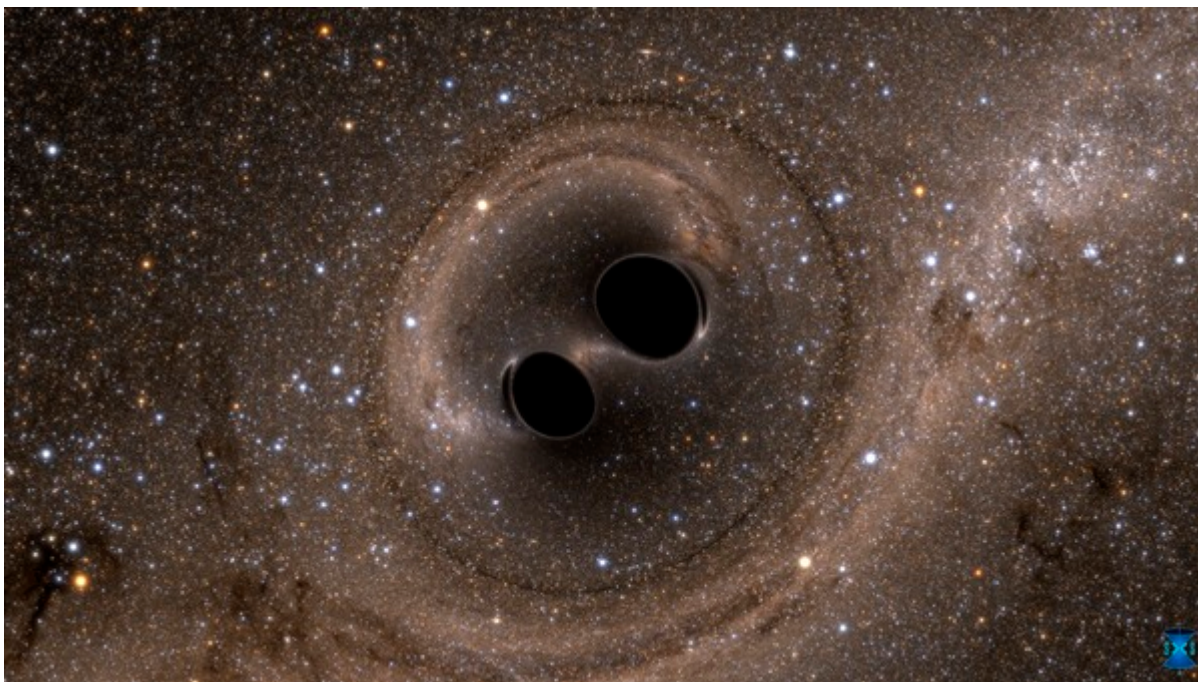


# Zwaartekrachtsgolven waargenomen!

*De internetberichten en nieuwsitems zullen u waarschijnlijk niet ontgaan zijn: zwaartekrachtsgolven zijn waargenomen! [Vorige week](#) schreven we op deze site al iets over de speurtocht naar golven in de ruimtetijd, maar vandaag werden de al weken rondgonzende geruchten definitief bevestigd. Het is het Amerikaanse LIGO-team gelukt om het bestaan van zwaartekrachtsgolven experimenteel aan te tonen. Tijd voor een update, dus: wat zijn zwaartekrachtsgolven nu precies, wat is er waargenomen, en wat betekent dat voor onze kennis van de natuur?*



**Afbeelding 1.** Twee zwarte gaten smelten samen. De zwaartekrachtsgolven die zijn waargenomen zijn waarschijnlijk afkomstig van een proces zoals hierboven, waarbij twee zwarte gaten samensmelten tot één nieuw zwart gat. Afbeelding: LIGO.

In dit artikel:

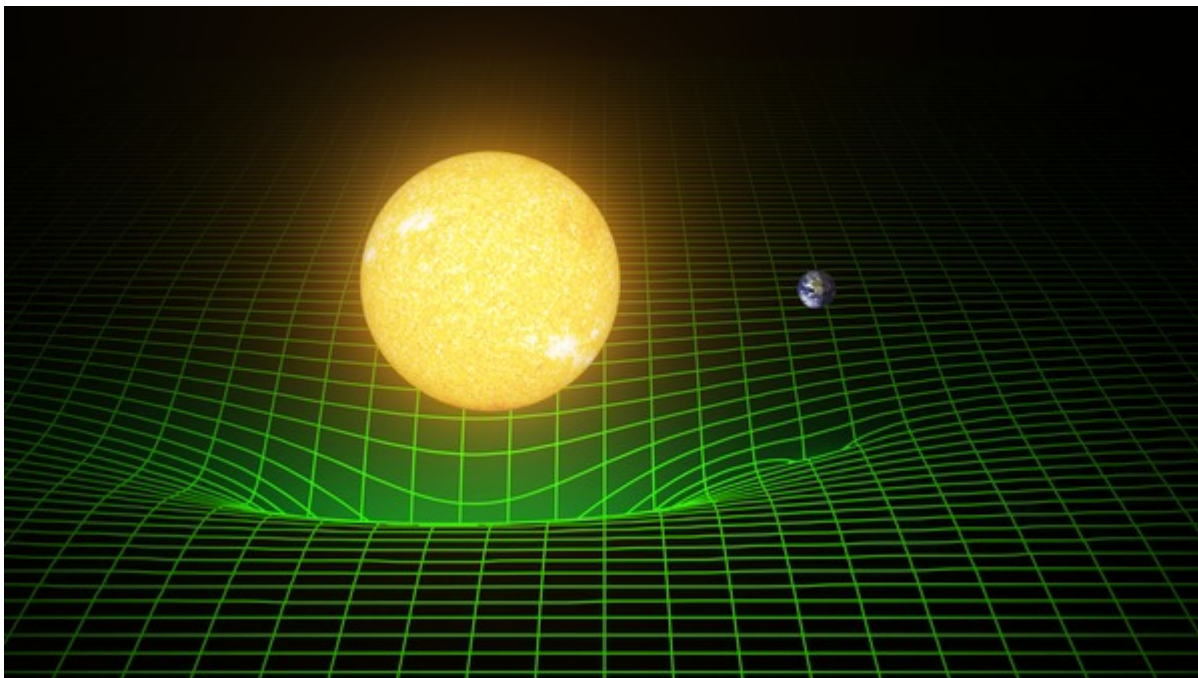
- [Golven in de ruimtetijd](#)
- [Indirecte waarnemingen](#)

- [Directe waarnemingen](#)
- [Waargenomen!](#)
- [Het belang van de ontdekking](#)
- [Meer weten?](#)

## Golven in de ruimtetijd

Golfverschijnselen komen overal in de natuur voor. Gooi een steen in het water, en het oppervlak zal gaan golven. Klap in je handen, en er ontstaat een golfpatroon in de luchtdruk: geluid. Laat elektronen door een antenne op- en neerbewegen, en het elektromagnetische veld eromheen zal gaan trillen: radiogolven.

Vrijwel elke substantie kan golven. Sinds ruim een eeuw weten we dat ook de ruimte zélf – of netter gezegd: de ruimte en de tijd samen, de ruimtetijd – een “substantie” is. In zijn beroemde [algemene relativiteitstheorie](#) liet Albert Einstein zien dat ruimte en tijd een kneedbaar, vervormbaar geheel vormen; niet vlak als een schoolbord, maar met bochten en deuken als een rubberen vel. Materie beweegt zich voort door dit vervormde ruimterubber, en beweegt daardoor niet in rechte, maar in kromme banen – een effect dat wij ervaren als zwaartekracht.



**Afbeelding 2. Zwaartekracht als vervorming van de ruimtetijd. Zware objecten zoals de zon en de aarde, vervormen de ruimte (en zelfs de tijd) om zich heen. Andere objecten die door die ruimte bewegen, bewegen dus ook in gekromde banen - een effect dat wij ervaren als de zwaartekracht. Afbeelding: LIGO.**

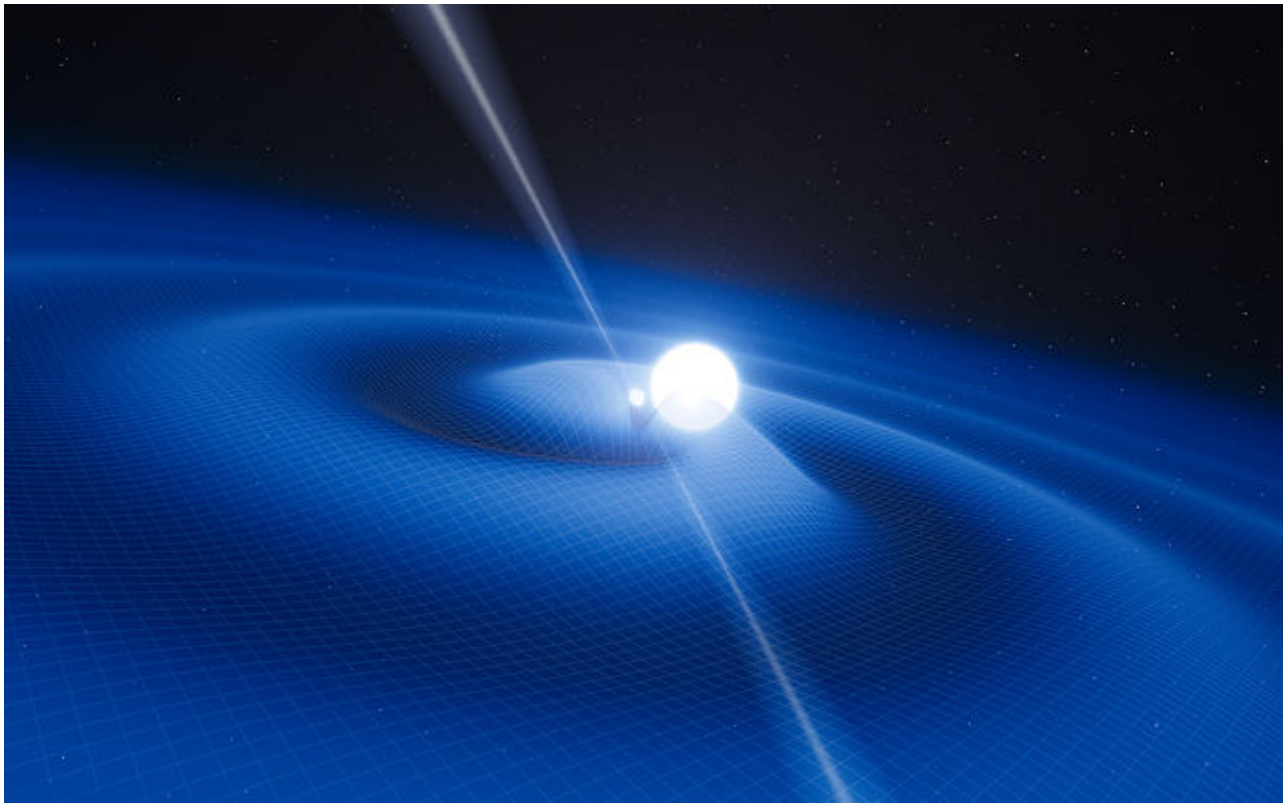
De vraag ligt dus voor de hand: kan ook de ruimtetijd golven? De theorie van Einstein voorspelde van wel. Net zoals een wateroppervlak gaat golven als we er een steen in laten vallen, zou ook het rubber van de ruimtetijd moeten gaan trillen als het ergens een flinke verstoring ondervindt. Maar hoe gooi je een steen in de vijver van de ruimtetijd? En hoe meet je vervolgens de golven die ontstaan?

[Naar boven](#)

## Indirecte waarnemingen

Bij het waarnemen van gravitatiegolven komt één groot probleem kijken: de effecten van deze golven zijn absurd klein. We hebben het hier over vervormingen ter grootte van één deel in  $10^{20}$  of minder - een vervorming, met andere woorden, van een fractie van de grootte van een atoomkern op een schaal van enkele kilometers. Het leek Einstein zelf onmogelijk om dergelijke kleine effecten ooit direct te kunnen meten.

Wat *indirecte* metingen betreft was er meer kans van slagen. Al in 1974 werd daarmee begonnen, toen Russell Hulse en Joseph Taylor een tweetal neutronensterren ontdekten die op zeer korte afstand rond elkaar draaien. Neutronensterren zijn enorm compacte objecten: zo zwaar als zon, maar met een straal kleiner dan de doorsnede van Nederland. Wanneer twee van deze zwaargewichten op korte afstand rondjes rond elkaar draaien, heeft dat enorme effecten op het zwaartekachtsveld. De gezochte steen in de vijver, dus.



**Afbeelding 3. De Hulse-Taylorster.**Een 'artist impression' van de Hulse-Taylorster, en de gravitatiegolven die het systeem uitzendt. Afbeelding: ESO.

Toch zijn de zwaartekrachtsgolven van de Hulse-Taylorster, zoals het paar van neutronensterren is gaan heten, nog veel te klein om direct te meten. Wanneer de rimpels in de ruimtetijd ons bereiken, zijn ze zo ver uitgedoofd dat het effect nog eens een miljoen keer kleiner is dan hierboven werd beschreven. Wat wél te meten is, blijkt het energieverlies te zijn dat de sterren ervaren door het continu uitzenden van zwaartekrachtsgolven. Dat energieverlies leidt ertoe dat de sterren steeds dichter en sneller om elkaar heen gaan draaien, en die verandering in de draaisnelheid kan gemeten worden. De Hulse-Taylorster wordt inmiddels al zo'n veertig jaar op de voet gevolgd, en de afname in de draaisnelheid blijkt met een afwijking van minder dan 0,2% nauwkeurig overeen te komen met de afname die de theorie van zwaartekrachtsgolven voorspelt.

Een prachtig resultaat, dat Hulse en Taylor in 1993 de Nobelprijs voor de natuurkunde opleverde. Toch gaat het natuurlijk nog maar om een indirect effect. Zou het ondanks Einsteins pessimisme ook mogelijk zijn om de minimale vervormingen door zwaartekrachtsgolven direct hier op aarde te meten?

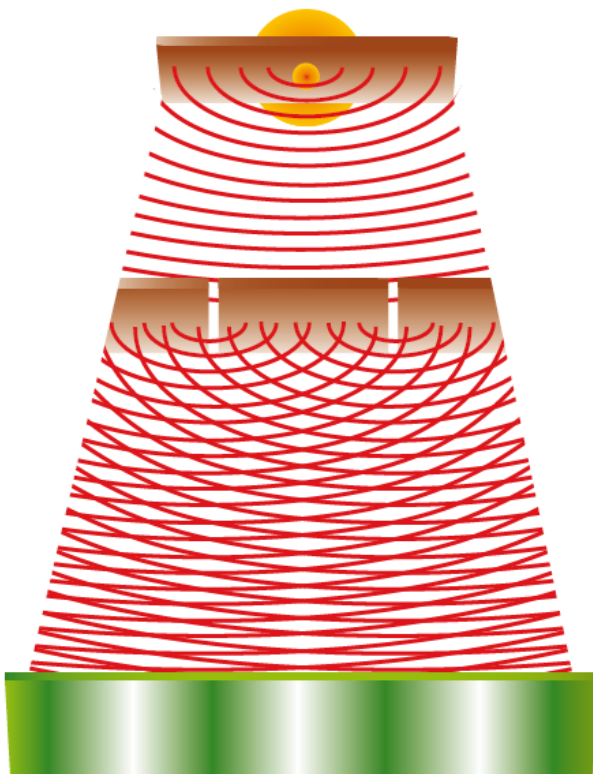


[Naar boven](#)

## Directe waarnemingen

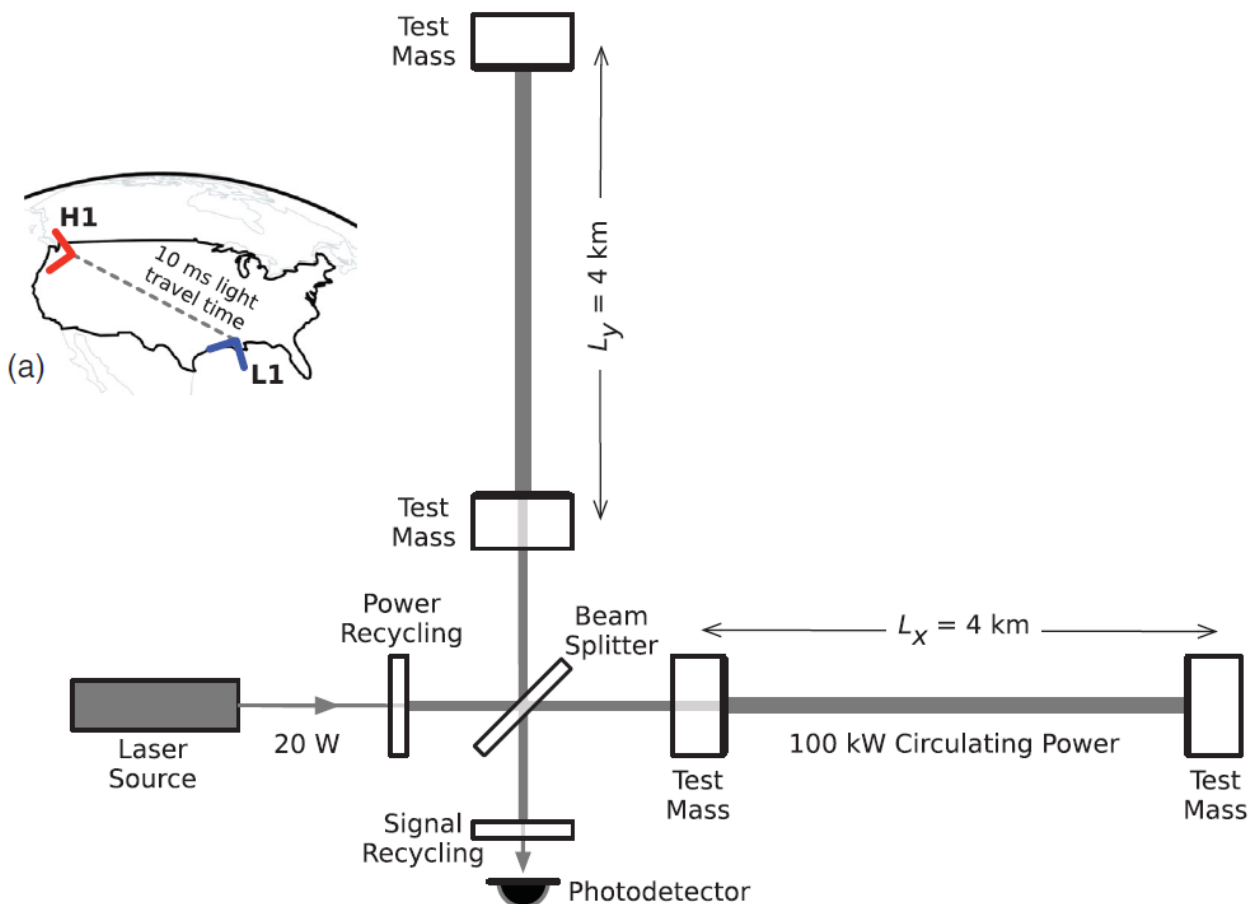
Dat laatste is precies wat het LIGO-team nu gelukt is. Dat daarbij sprake is van een technisch hoogstandje moge duidelijk zijn, want hoe meet je een vervorming van minder dan 1 op  $10^{20}$ ? En, even belangrijk: hoe meet je die vervorming als je je zelf in de vervormende ruimtetijd bevindt? Een gewone meetlat gebruiken kan niet, want die vervormt natuurlijk zelf ook mee.

De oplossing bleek uiteindelijk te liggen in het begrip *interferentie*. Ook interferentie is een golfverschijnsel, maar ditmaal van gewoon licht. Monochromatisch licht dat langs twee verschillende wegen van een lichtbron naar een meetpunt reist, wordt versterkt als de twee weglengtes precies een geheel aantal golflengtes verschillen. Het licht wordt daarentegen juist verzwakt als het verschil tussen de weglengtes een halve golflengte meer of minder dan dat is. Dat maakt interferentie een ideaal hulpmiddel voor het meten van microscopisch kleine afstandsverschillen.



**Afbeelding 4. Interferentie van licht.**Als licht van één kleur langs twee verschillende wegen een punt bereikt, kan het zichzelf afhankelijk van de afgelegde weglengtes versterken of juist verzwakken. Afbeelding uit het boek 'Snaartheorie' van de auteur van dit artikel.

Via een slim systeem van spiegels wordt in de LIGO-opstellingen licht door twee loodrecht op elkaar liggende, vier kilometer lange buizen heen-en-weergekaatst. Bij terugkomst wordt het interferentiepatroon van het licht gemeten, en wat men vervolgens doet is niets anders dan het nauwgezet in de gaten houden van kleine verschuivingen in dat interferentiepatroon. Komt er een zwaartekrachtsgolf langs die het buizensysteem in één richting vervormt, dan zal het interferentiepatroon periodiek veranderen, en die periodieke verandering – hoewel nog steeds enorm klein – kan gemeten worden. (Zie ook de animatie van *PhD comics* die we [vorige week plaatsten](#), en waarin dit proces ook wordt uitgelegd.)



**Afbeelding 5. Een schets van de LIGO-detectoren.**Horizontaal en verticaal zien we de twee 4 kilometer lange

buizen waardoor het licht beweegt. In de inzet is te zien waar in Amerika de twee detectoren zich bevinden.

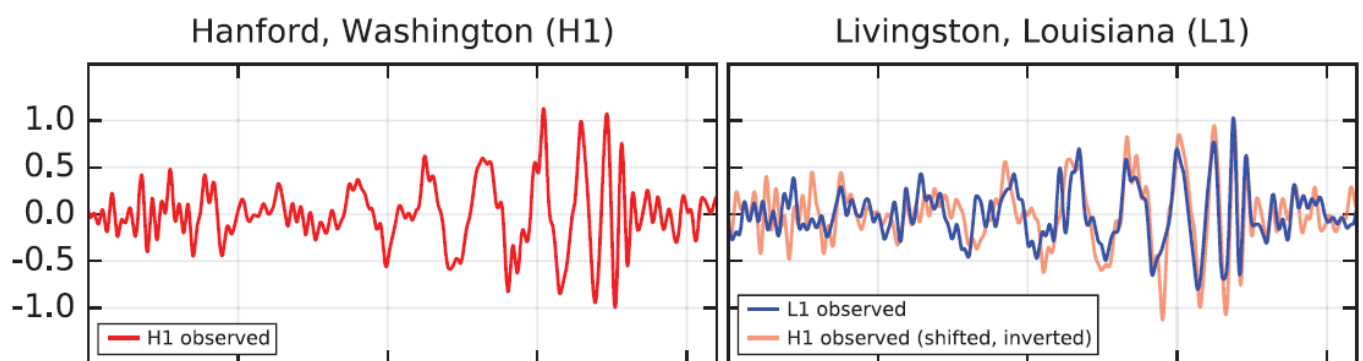
**Afbeelding: LIGO.**

Daarmee was één probleem nog niet opgelost: als er een vrachtwagen langs een van de vier kilometer lange buizen rijdt, of als er een kleine aardbeving is, gaan de spiegels ook een minieme fractie verschuiven. Hoe zie je het verschil tussen zulke aardse trillingen en de trillingen veroorzaakt door gravitatiegolven? De oplossing was eenvoudig: bouw niet één, maar twee detectoren. Als beide detectoren – die zich in dit geval meer dan 3000 kilometer van elkaar, in de Amerikaanse staten Washington en Louisiana bevinden – exact hetzelfde signaal meten, kan het niet gaan om vrachtwagens of aardverschuivingen, en is de kans dus groot dat de trilling uit het heelal afkomstig is.

[Naar boven](#)

## Waargenomen!

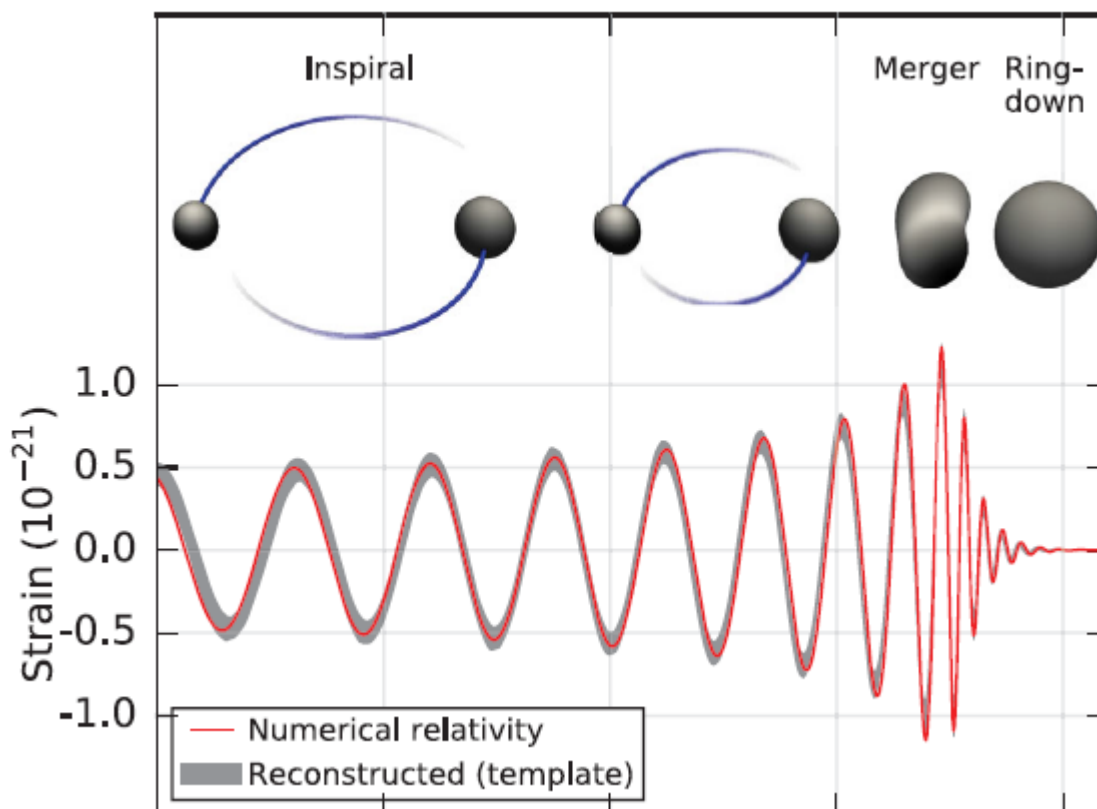
Dat laatste is nu precies wat er gebeurd is. In september 2015, nog tijdens de testruns van de LIGO-opstellingen, was het direct raak. Beide detectoren namen vervormingen waar die (zie afbeelding 6) tot in detail op elkaar leken. En dat niet alleen: de vorm van de trilling bleek ook nog eens prachtig overeen te komen met een voorspeld fenomeen.



**Afbeelding 6. De LIGO-waarnemingen.** Links de trillingen zoals die in de staat Washington zijn waargenomen; rechts in het oranje diezelfde metingen en in het blauw de metingen in de staat Louisiana, meer dan 3000 kilometer verderop. De trillingen komen zoals we zien prachtig overeen. **Afbeelding: LIGO.**

Dat fenomeen, de steen in de vijver, is in dit geval een rond elkaar draaiend paar van zwarte gaten. Zwarte gaten zijn nóg massievere objecten dan neutronensterren, wat betekent dat ook de gravitatiegolven van zo'n systeem sterker zijn. Bovendien duurt het veel korter tot

dergelijke systemen zó dicht bij elkaar komen dat ze op elkaar storten – bij de Hulse-Taylorster duurt dat proces bijvoorbeeld zo'n drie miljoen jaar. Bij zwarte gaten verloopt de inwaardse spiraal veel sneller, en in de laatste fase van die spiraal wordt een heel duidelijk signaal uitgezonden. Naarmate de zwarte gaten dichterbij elkaar komen, worden de verstoringen in het zwaartekrachtsveld snel sterker, en wordt de frequentie van de trilling hoger. Die versterking en versnelling neemt toe totdat de zwarte gaten samensmelten tot één nieuw zwart gat, waarna de steen in het water gezonken is, en de zwaartekrachtsgolven vrijwel direct verdwijnen.



**Afbeelding 7. Twee samensmeltende zwarte gaten.** Deze afbeelding toont het resultaat van een simulatie waarin twee zwarte gaten samensmelten. Bovenin is dat proces grafisch weergegeven; onderin zien we het verwachte signaal dat dit proces in de LIGO-detectoren oplevert. Als we deze afbeelding vergelijken met de daadwerkelijke metingen, afbeelding 6, zien we duidelijke overeenkomsten in het steeds sneller en sterker worden (en vervolgens verdwijnen) van het signaal. Afbeelding: LIGO.

Dit is precies wat in de afbeeldingen 6 (daadwerkelijke metingen) en 7 (een simulatie) te zien is. De LIGO-onderzoekers moeten stomverbaasd geweest zijn dat direct in september al een zo duidelijk signaal zichtbaar was. Ze hebben – zoals het goede wetenschappers betaamt –



dus eerst enkele maanden besteed aan het verder onderzoeken van de waarneming, en aan pogingen om het signaal op ándere manieren te verklaren. Nu, ruim vier maanden later, is men er echter van overtuigd dat we hier daadwerkelijk de gravitatiegolven van de samensmelting van twee zwarte gaten zien – en dat is dan ook wat er vandaag op de persconferentie werd aangekondigd.

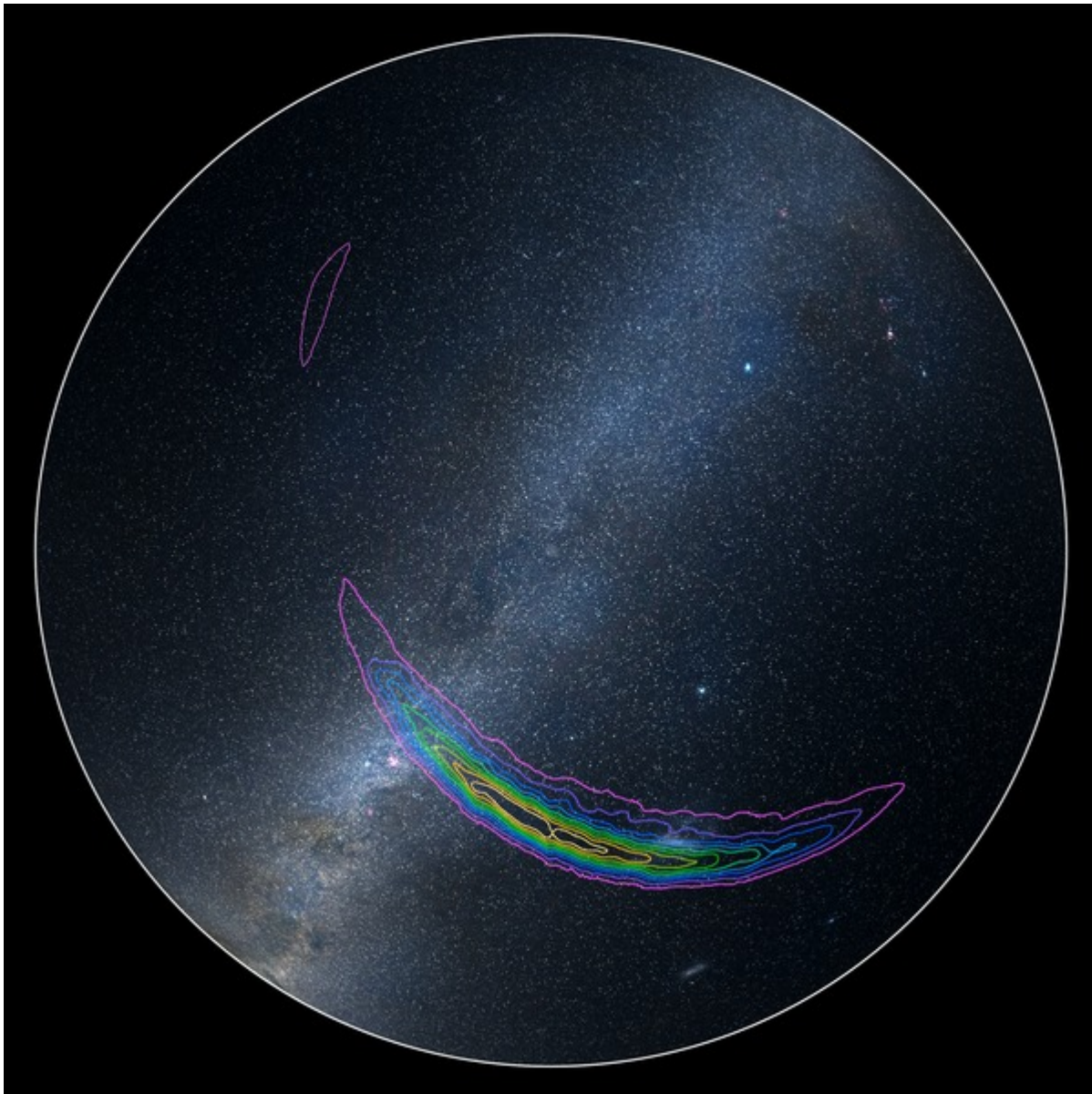
[Naar boven](#)

## Het belang van de ontdekking

De enorme aandacht rond deze ontdekking roept misschien de vraag op waarom het waarnemen van zwaartekrachtsgolven zo'n *big deal* is. De theorie die deze golven voorspelt, de algemene relativiteitstheorie, is immers al honderd jaar oud, en is in die honderd jaar op allerlei andere manieren getest. Waarom nu dan zo'n heisa rond de zwaartekrachtsgolven?

Daarvoor zijn twee redenen te noemen. Ten eerste is dit voor het eerst dat de vervorming van de ruimtetijd – het centrale fenomeen van de algemene relativiteitstheorie – zo direct is waargenomen. Bij vorige tests ging het om de afbuiging van licht, om correcties op de banen van planeten, om het langzamer lopen van klokken, maar eigenlijk nooit om metingen aan de vorm van de ruimtetijd zélf. Dat maakt de waarneming van zwaartekrachtsgolven dus een veel 'tastbaarder' bewijs van de juistheid van de algemene relativiteitstheorie.

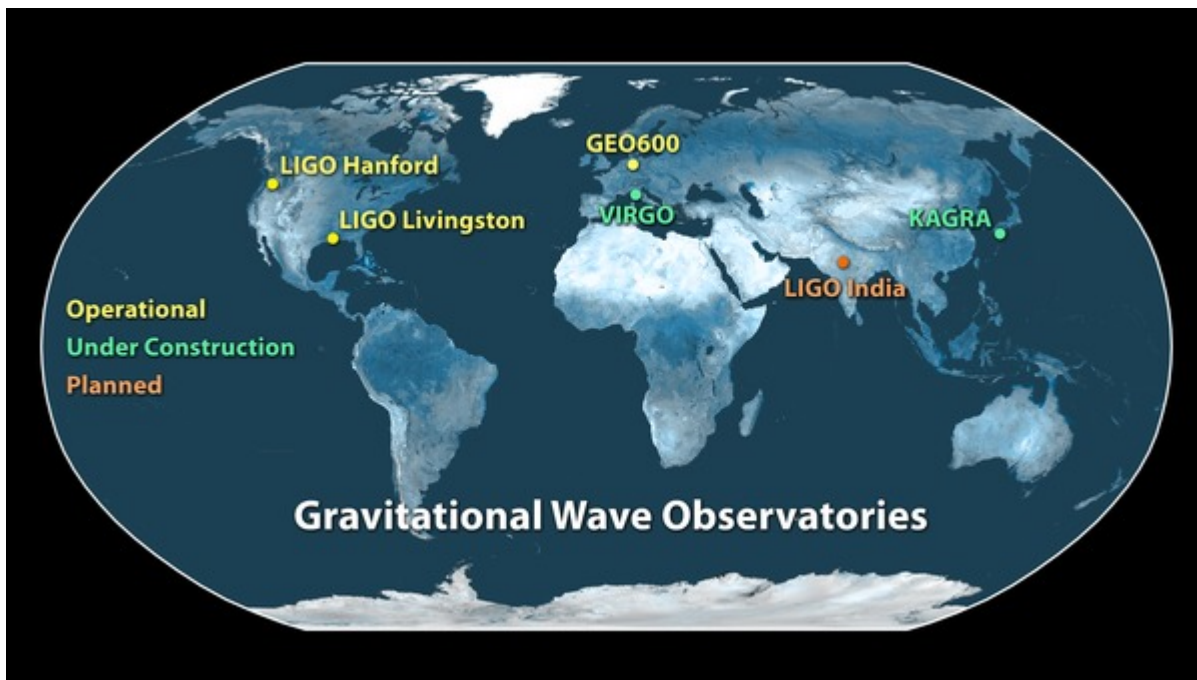
Veel belangrijker is echter dat dit technologische hoogstandje de weg opent naar een geheel nieuwe manier van waarnemen. Nog nooit is er zo direct een waarneming aan zwarte gaten gedaan: die objecten zijn, omdat ze zwart zijn, immers enorm moeilijk waar te nemen. Als we door een zwaartekrachtsbril kijken, zijn zwarte gaten echter de helderste objecten die er zijn! Juist metingen aan zwaartekrachtsgolven kunnen dus wel eens dé manier zijn om deze mysterieuze objecten beter te leren begrijpen.



**Afbeelding 8. De locatie van de samensmelting. Het paarse gebied geeft grofweg aan waar de samensmelting van de twee zwarte gaten aan de hemel ongeveer moet hebben plaatsgevonden. De cirkel is de sterrenhemel van horizon tot horizon. Afbeelding: LIGO.**

Daarbij is nog wel een weg te gaan. Doordat de LIGO-meting met twee detectoren gedaan is, kan uit de tijdstippen waarop de golven aankwamen bijvoorbeeld grofweg bepaald worden in welke richting de samensmelting van de zwarte gaten heeft plaatsgevonden. Die bepaling (zie afbeelding 8) is echter nog lang niet nauwkeurig genoeg om dezelfde plek aan de hemel ook in visuele telescopen op te zoeken, en te bestuderen of we ook in zichtbaar licht kunnen zien wat er gebeurd is.

Op dit moment wordt er echter wereldwijd gebouwd aan diverse andere detectoren voor zwaartekrachtsgolven, en wanneer die (binnen enkele jaren) allemaal operatief zijn, moet het mogelijk worden om dergelijke plaatsbepalingen veel nauwkeuriger te doen, en de zwaartekrachtswaarnemingen te vergelijken met visuele waarnemingen. Kortom: het lijkt niet te veel gezegd als we beweren dat de metingen van LIGO de eerste stap zijn in een geheel nieuwe manier om extreem zware objecten zoals zwarte gaten te bestuderen. De toekomst zal leren welke verrassingen die nieuwe studie nog in petto heeft!



**Afbeelding 9.** De wereldwijde zoektocht naar gravitatiegolven. Geel: detectoren die op dit moment actief zijn, waaronder de twee LIGO-detectoren. Groen: detectoren waaraan nu gebouwd wordt. Oranje: een detector waarvoor de plannen al klaarliggen. Afbeelding: LIGO.

[Naar boven](#)

## Meer weten?

Hieronder een aantal links waarop u meer kunt lezen en zien over de LIGO-waarnemingen.

Engelstalig:

- [Website van LIGO](#), met informatie over de detectoren, veel afbeeldingen, en links naar de wetenschappelijke publicaties.

- [Tutorial over zwaartekrachtsgolven](#) van Cardiff University.
- [Gravitational waves: 6 cosmic questions they can tackle](#). Artikel van Davide Castelvecchi voor Nature News.
- [Gravitational waves detected , confirming Einstein's theory](#). Artikel met video van Dennis Overbye voor de New York Times.
- [Gravitational waves discovered at long last](#). Artikel van Natalie Wolchover voor Quanta Magazine.
- [Ligo sees gravitational waves](#). Artikel van Lauren Biron voor Symmetry Magazine.
- [Gravitational waves exist: the inside story of how scientists finally found them](#). Artikel van Nicola Twilley voor The New Yorker.
- ['Woohoo!' Email stokes rumor that gravitational waves have been spotted](#). Artikel van Adrian Cho voor Science Magazine.
- [What will it mean if LIGO detects gravitational waves?](#) Artikel van Ethan Siegel voor Forbes Magazine.
- [Five things to know about gravitational waves](#). Artikel van Danny Lewis voor Smithsonian Magazine.
- [Black Hole Hunter](#). Spel: vind het signaal van een zwaartekrachtsgolf.
- [Einstein@Home](#). Zoek zelf mee naar zwaartekrachtsgolven!

Nederlandstalig:

- [Site van het Nikhef](#) met informatie over zwaartekrachtsgolven.
- [Zenuwen onder wetenschappers over trillingen in de ruimte](#). Artikel in de Volkskrant van Martijn van Calmthout. (Voor de aankondiging.)
- [Eindelijk bewijs: de ruimte rilt, theorie van Einstein klopt](#). Artikel in de Volkskrant van Martijn van Calmthout. (Na de aankondiging.)
- [Waarom iedereen opgewonden moet zijn over de vermoedelijke vondst van zwaartekrachtsgolven](#). Weblog van George van Hal voor New Scientist.
- [Aanhoudend gerucht: gravitatiegolven gevonden?](#) Artikel van Jean Paul Keulen voor Kijk Magazine. (Voor de aankondiging.)
- [Gravitatiegolven voor het eerst direct waargenomen](#). Artikel van Jean Paul Keulen voor Kijk Magazine. (Na de aankondiging.)
- [Bestaan zwaartekrachtsgolven aangetoond](#). Artikel uit De Ingenieur.
- [Geruchten over zwaartekrachtsgolven deze keer vermoedelijk waar](#). Artikel uit New

Scientist.

- [Vijf vragen over zwaartekrachtsgolven](#). Weblog van Dorine Schenk voor New Scientist.
- [Liveblog](#) dat New Scientist bijhield voor, tijdens en na de bekendmaking.
- [Jeugdjournaal-aflevering](#) met uitgebreid aandacht voor zwaartekrachtsgolven.
- [Fragment uit De Wereld Draait Door](#) over zwaartekrachtsgolven.

*Met dank aan Jacqueline de Vree voor het verzamelen van de links.*

[Naar boven](#)