

Bruno van Wayenburg

# BILLINGEN

DOOR DE

# RUIMTE

New Scientist  
**Pocket Science**

Tien jaar zwaartekrachtgolven:  
een nieuwe kijk op het heelal

# Inhoud

Inleiding 7

- 1 De waarneming 9
- 2 Rimpelingen in de ruimtetijd 20
- 3 De dans van de zwarte gaten 32
- 4 Een stemvork van drie ton 43
- 5 Tijd voor de grote jongens 48
- 6 De bronnen 60
- 7 De oogst na tien jaar 69
- 8 De toekomst 83

Dankwoord 93

Index 95

Meer lezen? 99

# Inleiding

Zwaartekrachtgolven doken voor het eerst op aan mijn horizon toen ik in 2001 voor het Leidse universiteitsblad *Mare* een lang artikel schreef over MiniGRAIL, een koperkleurig glanzende metalen bol waarmee natuurkundige Giorgio Frossati ze wilde detecteren.

Het ongrijpbare natuurverschijnsel, afkomstig uit het diepe heelal, en de gigantische moeite die natuurkundigen staken in het betrappen ervan, vond ik fascinerend. Alleen al uitleggen waar het om ging, was een uitdaging. Hoe kon de ruimte zelf als een gelatinepudding vervormen, golven en rimpelen?

En hoe konden natuurkundigen ooit hopen om vat te krijgen op de absurd kleine effecten die zulke rimpelingen veroorzaakten? Een passerende zwaartekrachtgolf doet de dichtstbijzijnde ster, Alpha Centauri, eventjes wiebelen ten opzichte van de aarde. Maar die variatie in afstand is ongeveer zo dik als een haar. Detecteer het maar eens.

De poging van Frossati strandde dan ook: nooit mat hij zwaartekrachtgolven, en zijn metalen bol hangt nu in museum Boerhaave in Leiden, zoals beschreven in hoofdstuk 4. Maar ongelofelijk genoeg lukte het een grote groep internationaal samenwerkende natuurkundigen wel om LIGO te

bouwen, een detector die op 14 september 2015 voor het eerst onmiskenbaar zwaartekrachtgolven betrapte en daarmee ook voor het eerst zwarte gaten direct waarnam.

Dat moment, even in het wereldnieuws, is nu tien jaar geleden. We zijn honderden detecties verder en er is een wereld opengegaan van botsende zwarte gaten en neutronensterren, en van nog onbekende of onbegrepen processen in het heelal. Zwaartekrachtgolven bieden, naast licht en andere elektromagnetische straling die telescopen opvangen, een compleet nieuw venster op het heelal, waardoor we nieuwe, andere, voorheen onzichtbare verschijnselen kunnen bestuderen.

Nieuwe zwaartekrachtgolvendetectoren zijn in aanbouw of gepland, en technologie ontwikkeld voor ooit onmogelijk geachte metingen, vindt langzaam zijn weg naar aardse toepassingen.

In het boekje dat voor u ligt beschrijf ik de lange reis naar dit moment, van Einsteins briljante idee van de vervormende ruimtetijd en de eerste frustrerende detectiepogingen tot het ingenieuze ontwerp van de kilometers grote detectors in de vs, Italië en in de toekomst mogelijk ook Limburg – en zelfs in een baan om de zon.

Maar zwaartekrachtgolven zijn niet alleen ver weg. De ruimte waarin ik dit zit te schrijven, en de ruimte waarin u dit zit te lezen, rilt, schudt en beeft, doorspoeld door golvingen die zijn opgewekt door gebeurtenissen op honderden miljoenen lichtjaren afstand. U en ik kunnen die rillingen niet horen of voelen, maar sinds die septemberdag in 2015 weten we zeker dat ze er zijn.

*Groningen, 13 augustus 2025*

# 1

## De waarneming

Een van de grootste natuurkundige ontdekkingen van deze eeuw werd in Europa gedaan – op een instrument dat zich in de Verenigde Staten bevond. Op maandag 14 september 2015, even voor elfen in de ochtend, zag Marco Drago een grafiekje op zijn computerscherm verschijnen waarvan hij de vorm wel kon dromen: Een sinus-achtige golf die naar rechts toe steeds sneller en steeds krachtiger heen en weer slingerde, totdat hij abrupt ophield. Was dit het kenmerkende signaal van een zwaartekrachtgolf, veroorzaakt door twee botsende zwarte gaten?

Drago zat aan zijn stoel genageld. ‘Ik had geen idee wat ik moest doen’, vertelde de toen 32-jarige natuurkundige later aan het Amerikaanse tijdschrift *The New Yorker*. Hij was net gepromoveerd en werkte als postdoctoraal onderzoeker bij het Albert Einstein Instituut, ook bekend als het Max Planck Instituut voor Zwaartekrachtfysica in Hannover. Dat kreeg de data live doorgestuurd. Drago: ‘Ik weet niet meer precies wat ik zei. Waarschijnlijk iets als: ‘Holy shit, wat is dit?’

Het signaal was afkomstig van LIGO, wat staat voor Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. Het is een immense meetinstallatie, dubbel uitgevoerd in de Amerikaanse staten Louisiana en Washington. Ieder van de twee

zogenoemde interferometers bestaat uit twee haaks op elkaar staande, vier kilometer lange vacuümbuizen, met daarin trillingsvrij opgehangen ultragladde spiegels. Door de buizen lopen laserbundels die heen en weer kaatsen tussen de spiegels. Het laserlicht wordt op zo'n manier gecombineerd en gedetecteerd, dat de hele installatie uitiem gevoelig is voor de miniemste beweging van de twee spiegels aan de uiteinden van de buizen. Op die 14e september detecteerde LIGO zo zijn eerste zwaartekrachtgolf.

Het bouwen en in gebruik nemen ervan had honderden miljoenen dollars gekost, plus bloed, zweet en tranen van duizenden natuurkundigen sinds de jaren zeventig, toen het idee voor LIGO geboren werd. Dat waren niet alleen Amerikanen, overigens, maar ook natuurkundigen uit andere landen zoals Italië, waar Drago vandaan kwam, uit Duitsland, waar hij werkte, en uit Nederland. In al die landen hadden natuurkundigen zich op de jacht op de zwaartekrachtgolf gestort in de LIGO-Virgo-samenwerking (in Italië was een detector met de naam Virgo in aanbouw).

### **Einsteins kromme ruimtetijd**

Het moment viel precies honderd jaar nadat Albert Einstein het bestaan van zwaartekrachtgolven had voorspeld. In 1915 had de Duitse natuurkundige zijn algemene relativiteitstheorie gepubliceerd, een revolutionaire herformulering van de natuurkunde. Zwaartekracht, het verschijnsel dat massa's zoals bijvoorbeeld de aarde en de zon elkaar aantrekken, is het gevolg van de plooibaarheid van ruimte en tijd, stelde de theorie. Eerder had Einstein al laten zien dat ruimte en tijd innig met elkaar verweven zijn en ze in één begrip verenigd: de ruimtetijd. Nu stelde hij dat deze ruimtetijd als het ware krom trekt onder de invloed van

massa's als de zon, en dat de baan van de aarde daardoor ook gekromd is.

De theorie voorspelde niet alleen de banen van planeten, wat eerder de zwaartekrachttheorie van de Britse natuurkundige Isaac Newton ook al deed, maar ook een aantal compleet nieuwe verschijnselen. Het eerste daarvan was het bestaan van zwarte gaten, een extreme concentratie van massa waaraan niets, zelfs geen licht, kon ontsnappen. Aan het bestaan van zwarte gaten werd lang getwijfeld. Einstein zelf zag ze als een rare en onwerkelijke uitschieter van zijn theorie – maar sinds de jaren zestig is steeds duidelijker geworden dat ze echt bestaan, bijvoorbeeld in het centrum van ons eigen melkwegstelsel.

Een tweede voorspelling was dat de ruimtetijd niet alleen kon vervormen, maar dat zulke vervormingen zich ook kunnen voortplanten, als golven over het water, of als geluidsgolven die niet door de lucht gedragen worden, maar door het weefsel van de ruimtetijd zelf.

### **Zwaartekrachtgolven waarnemen**

Maar het daadwerkelijk detecteren van zwaartekrachtgolven, waarbij de twee spiegels van LIGO zouden wiebelen over de absurd kleine afstand van ongeveer 1 femtometer, een duizendste van de dikte een atoomkern, was nog niet gelukt. LIGO zou voor het eerst moeten bewijzen dat het kon.

In september 2015 was eindelijk Advanced LIGO klaar, een gevoeliger versie van de interferometer, die een reële kans zou hebben om een waarneming te doen. Maar de officiële meetcampagne zou pas op 18 september beginnen. Om de deadline te halen deden onderzoekers in de LIGO-interferometer in Livingston (Louisiana) nog volop tests met de apparatuur op hun vrije zondag 13 september. Om vier uur in de

## Een stemvork van drie ton

‘Evidence of Gravity Waves Reported; Scientist Announces That He Has Made Recordings of Gravitational Waves’, kopte de *New York Times* op 15 juni 1969, een paar weken voordat Apollo 11 op de maan landde. Het bericht vertelde hoe het onderzoeksteam van de Amerikaanse natuurkundige Joseph ‘Joe’ Weber van de Universiteit van Maryland zwaartekrachtgolven had opgepikt met behulp van twee aluminium staven.

Zo’n staaf of *bar* was een aluminium cilinder van 2 meter lang en 1 meter in diameter, die met rubberen vering zo geïsoleerd mogelijk mogelijk was opgehangen, om te voorkomen dat bijvoorbeeld seismische trillingen de metingen zouden verstoren. Het idee was dat een passerende zwaartekrachtgolf de staaf heel even miniem zou doen krimpen en uitzetten. Als die golf precies de juiste frequentie had, zou de staaf blijven natrillen als een aangeslagen stemvork. Dat zou dan worden opgepikt door extreem gevoelige, ‘piëzo-elektrische’ trillingsmeters die op de staaf waren geplakt.

Ondanks alle isolatie pikte de staaf allerlei trillingen op: seismische trillingen van de aarde, voorbijrijdend verkeer, geluid van mensen die in het laboratorium aan het werk waren, trillingen van elektrische apparaten.

## Twee staven

Om die reden gebruikte Weber twee staven, een op anderhalve kilometer van de campus in Maryland en een andere in het Argonne National Laboratory in Lemont, Illinois, 1100 kilometer verderop. Alle trillingen die niet veroorzaakt werden door zwaartekrachtgolven, zouden daardoor verschillend zijn, redeneerde Weber. Alleen als de staven allebei op vrijwel hetzelfde moment zouden aanslaan, moest de puls wel afkomstig zijn van een zwaartekrachtgolf, die kort na elkaar door de beide staven heen golfde.

Na jaren meten en gestaag verbeteren van zijn aluminium staven verklaarde Weber in 1969 tijdens een conferentie victorie: er waren zwaartekrachtgolven gemeten. In een artikel in *Physical Review Letters* beschreef hij hoe de twee staven over een periode van 81 meetdagen 24 'coïncidenties' gemeten hadden, zoals de gelijktijdige trillingen genoemd werden. Dat leidde tot krantenkoppen (in Amerikaanse kranten tenminste, de Nederlandse repten er met geen woord over), en instant-beroemdheid voor Weber. 'Vijf dagen lang werd ik behandeld als de grootste wetenschapper in de wereld', schreef hij daar zelf later over.

Weber (1919–2000), zoon van twee joodse immigranten uit Litouwen, leerde met elektronica omgaan als radar-expert bij de marine tijdens de Tweede Wereldoorlog, en overleefde het zinken van zijn schip, de *uss Lexington*. Na de oorlog werd hij elektrotechnisch ingenieur aan de Universiteit van Maryland, waar hij tegelijkertijd natuurkunde studeerde en erin promoveerde.

Weber bedacht het concept van de *maser* (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*), een voorloper van de nu alomtegenwoordige laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*). De laser leidde tot een revolutie in de optica en communicatie en maakte daarnaast

## 5

# Tijd voor de grote jongens

De bars, de metalen staven die als een stemvork zwaarte-krachtgolven moesten oppikken, werkten dus niet. De allereerste detectie van zwaarte-krachtgolven vond in 2015 plaats met behulp van een interferometer, een ingewikkeld doolhof van spiegels, laserbundels en hypergevoelige apparatuur, met twee loodrechte armen van vier kilometer. Vanaf 1994 werd op twee locaties in de vs zo'n detector gebouwd. Anders dan het idee van een stemvork, is het werkingsprincipe van een interferometer niet erg intuïtief, al is het uiteindelijk ook weer niet zó ingewikkeld.

### Interferometers

Interferometers worden in de natuurkunde veel gebruikt. Ze maken gebruik van het feit dat licht bestaat uit elektromagnetische golven. Net als de rimpelingen in bijvoorbeeld een vijver, hebben lichtgolven pieken en dalen. Twee lichtgolven die gecombineerd worden, kunnen 'interferentie' vertonen: de pieken van de ene golf vallen dan bijvoorbeeld precies in de dalen van de andere golf, waardoor de golven elkaar netto opheffen: de golven doven elkaar dan uit. Dit heet 'negatieve interferentie'. Maar als de pieken van de twee

## De oogst na tien jaar

1,3 miljard jaar geleden, toen op aarde voorzichtig de eerste meercellige organismen in de oceaan verschenen, tolden ergens in het heelal twee zwarte gaten om elkaar heen. Het ene zwarte gat was 29 maal zo zwaar als de zon, en had een diameter van 180 kilometer. Het andere had een massa 36 keer zo groot als de massa van de zon en mat 220 kilometer. Met die afmetingen had het geheel nog net in Nederland gepast, al zou daarbij wel meteen de hele aarde opgeslokt zijn.

Hoe de twee zwarte gaten elkaar ooit gevonden hebben, is onduidelijk. Wel weten we dat de twee al miljoenen jaren om elkaar heen tolden. Doordat het stelsel op die manier zwaartekrachtgolven uitzond, verloor het gestaag draaiings-energie en kwamen de zwarte gaten steeds dichterbij elkaar te staan. Steeds sneller wentelden ze om elkaar heen, met steeds grotere snelheden. In hun laatste tiende secondes tolden ze nog tientallen malen om elkaar heen, tot ze met veel geweld op elkaar klapten en samensmolten tot één zwart gat. Dat zwarte gat, diameter 372 kilometer, had een massa van 62 zonsmassa's.

En dat terwijl de som van de twee oorspronkelijke zwarte gaten 65 zonsmassa's was. Het verschil, drie zonsmassa's, was

omgezet in energie, volgens Einsteins beroemde formule  $E = mc^2$ . Een kort moment straalden de twee samensmeltende zwarte gaten vijftig keer meer energie uit dan alle sterren in het bekende heelal bij elkaar, in de vorm van een krachtige zwaartekrachtgolf, een rimpeling in de vervorming van de ruimtetijd zelf, die zich met de lichtsnelheid verspreidde.

Een flinke tijd later, op 14 september 2015 in de vroege ochtend om precies te zijn, bereikte deze golf de aarde. Daar werd hij opgepikt door de twee detectoren van LIGO: eerst in Livingston, Louisiana, en 6,9 milliseconden later in Hanford, Washington, 3002 kilometer verderop (de VIRGO-detector in Cascina in Italië was al operationeel, maar was op dat moment uitgeschakeld voor technische verbeteringen).

Het signaal dat de LIGO-detectoren ontvingen, had de vorm van een karakteristieke *chirp*, een frequentie die binnen tienden van seconden opliep van 35 naar 250 trillingen per seconde. Daarna doofde het snel uit. Precies wat je verwacht bij een inspiral, een botsing van twee zware, compacte massa's na een lange, steeds snellere rondedans waarbij de massa's elkaar steeds dichterbij naderen.

### **‘Perfect wat we verwachtten’**

De uitkomsten van computersimulaties van deze botsing kwamen precies overeen met het gemeten signaal van LIGO, lieten 1145 onderzoekers van de LIGO Scientific Collaboration en de VIRGO Collaboration zien in een artikel in het natuurkunde-vakblad *Physical Review Letters*. De kans dat zo'n signaal toevallig zou optreden, schatten ze op eens in de 203.000 jaar. Een reeks artikelen beschreef GW150914, de allereerste directe detectie van zwaartekrachtgolven, in groot detail. De detectie was ook meteen de eerste waarneming van twee botsende zwarte gaten.