

ZWARTE GATEN: WAARNEMINGEN EN DE TOEKOMST

Figuur 1. Sagittarius A*, het zwarte gat in het centrum van onze Melkweg. Foto: EHT Collaboration.

In het artikel *Einsteins ruimtetijd* van Vincent Icke op pagina 12 kon u lezen wat zwarte gaten zijn en waarom natuur- en sterrenkundigen die kosmische ruimteverslinders zo interessant vinden. De algemene relativiteitstheorie doet al een ruime eeuw vermoeden dat zwarte gaten in ons heelal voorkomen. Die theorie alleen is al voldoende om enkele spannende boeken te vullen, zeker als je haar combineert met de quantummechanica. Maar hoe mooi een theoretische constructie ook is, we willen uiteindelijk met experimenten en waarnemingen controleren of het verschijnsel ook in de natuur voorkomt. Wat dat betreft leven we in een prachtige tijd: sinds enkele jaren kunnen we niet alleen aan zwarte gaten rekenen, maar ook precisiewaarnemingen doen – en de toekomst belooft alleen maar meer moois.

Experimenteren met mini-zwarte gaten in aardse laboratoria is vooralsnog volkomen onhaalbaar. Voor empirische kennis over zwarte gaten moeten we dus omhoogkijken, naar wat zich aan de sterrenhemel afspeelt. Dat klinkt logisch, maar is het dat ook? Eén probleem ligt al in de naam van de objecten: zwarte gaten zijn zwart – ze zenden nauwelijks straling uit. De vraag hoe je iets waarneemt dat je niet kunt zien, houdt natuur- en sterrenkundigen al vele tientallen jaren bezig. Tot voor kort lag de nadruk op indirecte waarnemingen: probeer vast te stellen hoeveel massa zich in een bepaald gebied bevindt en concludeer, door toch weer een beetje terug te vallen op de theorie, dat daar wel een zwart gat móét zijn. Zulke waarnemingen zijn op zichzelf al indrukwekkend. Je kunt online mooie animaties vinden van de bewegingen van sterren in het centrum van ons Melkwegstelsel. Die sterren bewegen zó snel rondjes om een centraal punt heen – in enkele jaren, tegenover de meer dan tweehonderd miljoen jaar die onze eigen zon over een rondje Melkweg doet – dat er na het nodige rekenwerk haast geen andere mogelijkheid overbleef: daar in het midden moest een aantrekkend object staan dat bijna niets anders kon zijn dan een zwart gat. Toch bleef de vraag: kunnen we zwarte gaten ook op de een of andere manier rechtstreeks waarnemen? Kunnen we ook echt bewijzen dat ze bestaan? De vraag is wat je precies met ‘direct’ en ‘bewijzen’ bedoelt, maar de ontwikkelingen van de afgelopen jaren zijn zodanig dat zelfs de grootste sceptici die vragen met ‘ja’ zullen beantwoorden.

Zwaartekrachtgolven

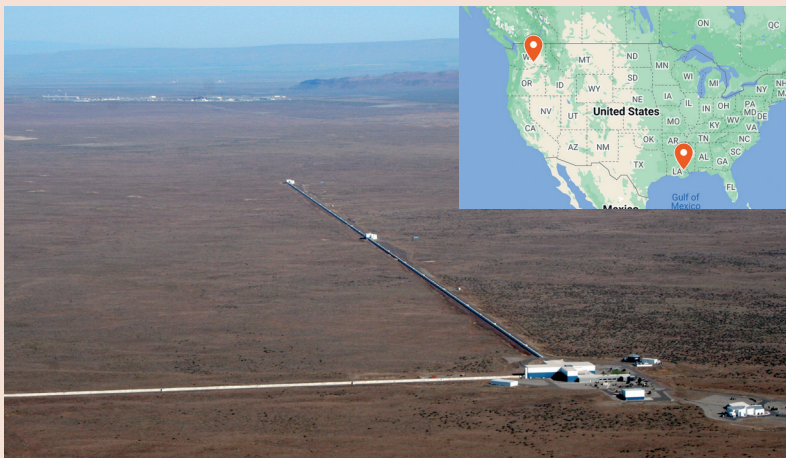
Omdat aan zwarte gaten geen licht of andere straling kan ontsnappen – de extreem kleine hoeveelheid quantummechanische straling die Stephen Hawking als eerste beschreef daargelaten – kunnen we hun horizon niet rechtstreeks zien. Toch is er een opzicht waarin zwarte gaten juist de helderste objecten in het heelal zijn: als we hun zwaartekracht meten!

Dat blijkt niet eenvoudig. Door de grote afstand is de zwaartekracht van zwarte gaten niet direct ‘voelbaar’ op aarde. Vergelijk het met het meten van de elektrische lading van elektronen. Dat kan eenvoudig als zo’n lading zich in ons laboratorium bevindt, maar ladingen op kilometers afstand zijn onmeetbaar. Dat verandert zodra we die ladingen laten bewegen. Denk aan een antenne: als elektronen daarin heen en weer bewegen worden er radiogolven uitgezonden die over gigantische afstanden meetbaar zijn. Zou zoiets ook met zwaartekracht kunnen?

In het artikel van Vincent Icke heeft u kunnen lezen dat ruimte en tijd ‘spul’ zijn, en dat zware objecten de ruimtetijd vervormen. Als diep in het heelal sterke zwaartekrachtbronnen heen en weer bewegen – bijvoorbeeld wanneer twee zwarte gaten om elkaar heen draaien – ontstaan er dan verdragende golven in de ruimtetijd? Uit de algemene relativiteitstheorie volgt dat het antwoord ‘ja’ is, maar óók dat het effect heel klein is. Twee verre, rondtollende zwarte gaten zouden in onze regionen bijvoorbeeld de afstand van de aarde tot de Maan niet veel meer doen variëren dan enkele atoomdiktes. Al in 1916 concludeerde Albert



Marcel Vonk is onderzoeker in de mathematische fysica aan de Universiteit van Amsterdam. Daarnaast is hij hoofdredacteur van de populairwetenschappelijke website Quantumuniverse.nl en auteur van een viertal populairwetenschappelijke boeken.



Figuur 2. Het LIGO-metstation in Hanford, Washington. Foto: Caltech/MIT/LIGO Laboratory. Inzet: de twee LIGO-locaties in Hanford, Washington en in Livingston, Louisiana. Afbeelding: Google Maps.

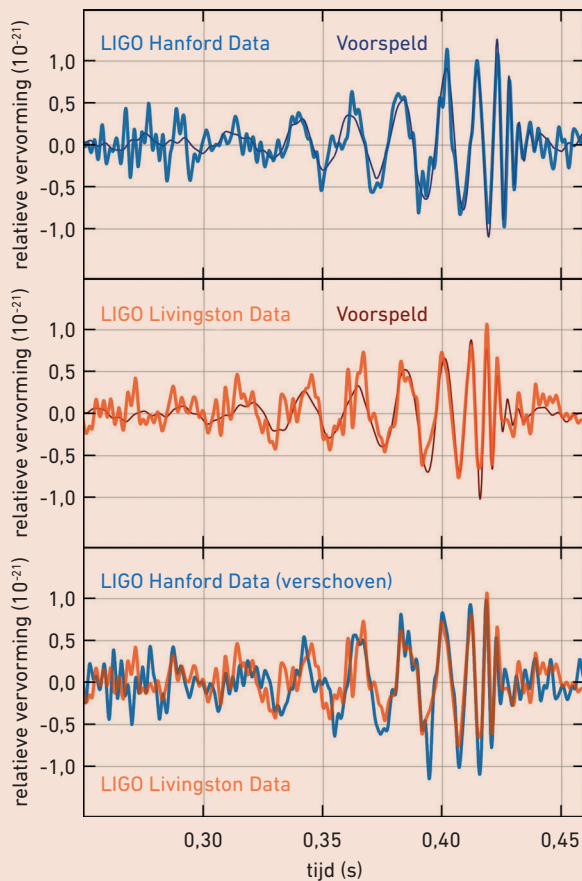
Einstein dat we zulke zwaartekrachtgolven nooit zouden waarnemen. Toch is dat wat op 14 september 2015 lukte met het Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) in de Verenigde Staten. In een wetenschappelijk en technologisch hoogstandje werd gemeten dat loodrecht op elkaar staande buizen met ieder een lengte van drie kilometer, waarin licht continu heen en weer kaatste, op een gegeven moment een héél klein beetje vervormden. Door licht dat langs één arm bewoog te laten interfereren met licht dat langs de andere arm bewoog – een oude truc om heel kleine verplaatsingen te meten – werd zichtbaar dat de spiegels aan de uiteinden van de L-vorm begonnen te trillen. Doordat exact hetzelfde effect op twee plaatsen werd gemeten, in Hanford in de staat Washington en 3000 kilometer verderop in een identieke opstelling in Livingston, Louisiana, waren aardse effecten uit te sluiten en werd duidelijk dat het hier om een zwaartekrachtgolf ging. De trilling van de ruimte, kwam ook uit de ruimte! Omdat de LIGO-apparatuur zich nog in de testfase bevond, werd grondig onderzocht of er echt geen andere verklaring voor de waarnemingen was. Op 11 februari 2016 werd de meting wereldkundig gemaakt en was

het voorpaginanieuws: zwarte gaten waren eindelijk rechtstreeks waargenomen! Ruim acht jaar later zijn al meer dan honderd soortgelijke gebeurtenissen waargenomen: zwaartekrachtgolven die de aarde bereiken, veroorzaakt door zwarte gaten en neutronensterren die in een spiraalbeweging steeds sneller naar elkaar toe tollen en uiteindelijk onder het uitzenden van een laatste blast van zwaartekrachtgolven op elkaar storten. Tegenwoordig draaien ook de Europese detector Virgo en de Japanse Kamioka Gravitational Wave Detector volop mee in de metingen. Rond 2030 komt daar een Indiase LIGO-detector bij en er zijn plannen voor nog eens twee ondergrondse detectoren met beduidend langere armen. In Nederland is de Einstein-telescoop het bekendst: volgens één van de voorstellen zal die zwaartekrachttelescoop, met armen van maar liefst tien kilometer lengte, in de regio rond het drielandenpunt gebouwd worden. Die locatie is overigens nog niet zeker: ook een Italiaans voorstel wordt serieus onderzocht. In Amerika denkt men intussen na over een detector met armen van zelfs veertig kilometer, de Cosmic Explorer. Het meest ambitieuze plan is een detector met armen van... 2,5 miljoen kilometer! De Laser Interferometer

Space Antenna, LISA, zal bestaan uit drie ruimtevaartuigen die in dezelfde baan als de aarde rond de zon draaien. Deze telescoop wordt zo gevoelig dat veel meer paren van zware hemelobjecten te meten zullen zijn, maar ook zwaartekrachtgolven die kort na de oerknal ontstonden. De nauwkeurigheid van de metingen wordt veel groter, waardoor kleine effecten in de golven zichtbaar worden. Er zijn zelfs voorstellen die suggereren dat de effecten van nieuwe, nog onbekende deeltjes in wolken rond verre zwarte gaten op deze manier gemeten kunnen worden.

Zwarte gaten op de foto

Hebben we zwarte gaten daarmee ook echt gezien? Bij 'zien' denken we aan licht, elektromagnetische straling dus, niet aan golven in de ruimtetijd. Het maken van een gewone foto van een zwart gat leek echter lange tijd onhaalbaar. Zwarte gaten zijn niet alleen zwart, maar ook heel compact en daardoor aan de hemel extreem klein. De kleinste details die een telescoop kan waarnemen – de resolutie – wordt bepaald door zijn doorsnede. De grens voor optische telescopen ligt daarvoor momenteel rond de tien meter en schotels van radiotelescopen kunnen nog enkele malen groter zijn. Is dat voldoende? Laten we ons eerst afvragen wat het grootst zichtbare zwarte gat is. Zwarte gaten kunnen ontstaan als restant van de heftigste supernova-explosies of door de opeenhoping van materie in de kernen van grote sterrenstelsels. Die laatste, hoewel verder weg, zijn zo veel groter dan stellaire zwarte gaten dat hun verschijning aan de hemel het grootst is. Het ligt daarmee voor de hand dat het zwarte gat midden in onze Melkweg het grootste aan de hemel zou zijn, maar dat blijkt net niet het geval: in het nabijgelegen sterrenstelsel M87 bevindt zich een zwart gat dat nog iets groter lijkt. Dat gigantische zwarte gat is bovendien logger en verandert trager, waardoor het makkelijker te fotograferen is. Over hoe 'makkelijk' hebben we het dan? Een telescoopspiegel met voldoende resolutie zou een doorsnede



Figuur 3. De eerste metingen van zwaartekrachtgolven, uit Hanford (boven) en Livingston (onder), vergeleken met de voorspellingen van de algemene relativiteit in lichtere kleur. Onderin zien we hoe goed de twee metingen op elkaar passen: we zien duidelijk twee keer dezelfde gebeurtenis. Afbeelding: Caltech/MIT/LIGO Laboratory.

moeten hebben vergelijkbaar met de grootte van de hele aarde! Gelukkig is voor die resolutie vooral de afstand tussen de verste punten van de spiegel van belang. Een gat in de spiegel (zie figuur 4) is voor de resolutie geen probleem.

Het idee kreeg in 2009 vorm als het Event Horizon Telescope-project: construeer uit radiotelescopen op diverse plekken van de aarde een effectieve telescoop die 'meer gat dan spiegel' is, met voldoende resolutie om foto's van de grootste zwarte gaten te maken. Hetzelfde idee wordt voor optische telescopen al jarenlang gebruikt: de bekende Very Large Telescope bestaat bijvoorbeeld uit vier telescopen met doorsnedes van 8,2 meter. Natuurlijk

is de uitvoering nog niet zo eenvoudig. Het op de juiste manier combineren van het licht van de verschillende telescopen is een flinke uitdaging. In 2019 was het technische hoogstandje voltooid en was er wederom voorpagina-nieuws: een foto van het zwarte gat in M87.

Op de foto – afgebeeld in het artikel *Telescopen, experimenten en filosofen* op pagina 26 – zien we een zwarte schijf voor een veel lichtere achtergrond. Die schijf is ongeveer vijf keer zo groot als het zwarte gat zelf, want ook licht dat vlak langs het zwarte gat komt, wordt aangetrokken en afgebogen. Wat we zien wordt daarom ook wel de 'schaduw' van het zwarte gat genoemd. Het licht net daarbuiten is het interes-

ZWARTE GATEN – GEVANGEN IN RUIMTE EN TIJD

Het heelal spreekt tot de verbeelding en zwarte gaten zijn een blijvende bron van fascinatie. In dit rijk geïllustreerde boek onttraft theoretisch fysicus en wetenschapspopularisator Marcel Vonk dit natuurkundige fenomeen en beschrijft hij hoe zwarte gaten niet alleen tot intrigerende wetenschappelijke raadsels leiden, maar ook juist de mysteries van het heelal helpen oplossen.

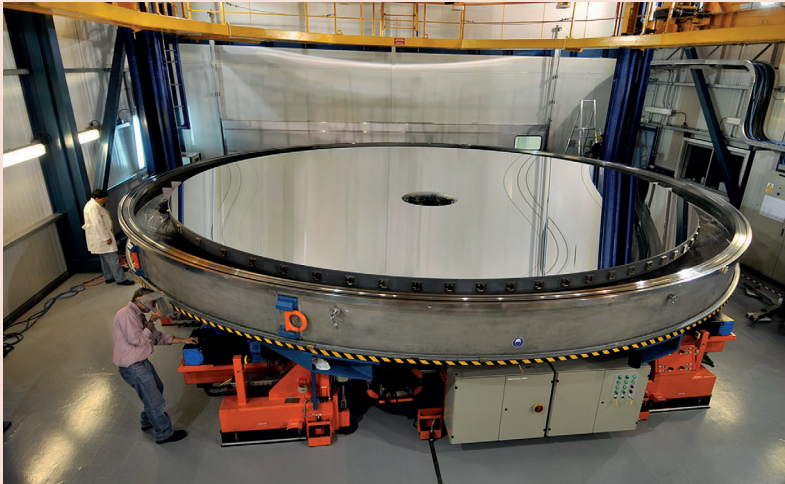
In de vorige eeuw werden zwarte gaten vooral op theoretisch vlak bestudeerd. De afgelopen jaren worden echter steeds meer technieken ontwikkeld waarmee deze ongrijpbare hemellichamen ook daadwerkelijk kunnen worden waargenomen. Het boek, gepubliceerd in 2017, behandelt de nieuwe observationele ontwikkelingen, de laatste theoretische inzichten en ons begrip én onbegrip van zwarte gaten.



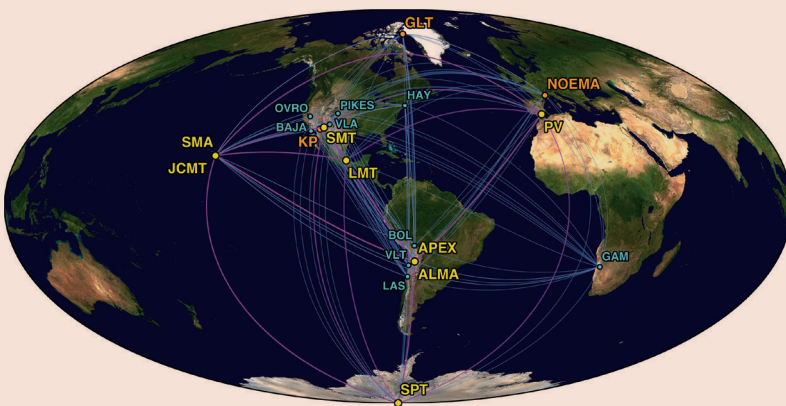
Zwarte Gaten, Gevangen in Ruimte en Tijd, Marcel Vonk, Amsterdam University Press, 2017, 216 pagina's, 9789462984196, €20,00.

santst, want dat bevat informatie over de directe omgeving, het draaien en het elektromagnetische veld van het zwarte gat, en over het afbuigproces zelf – over de algemene relativiteitstheorie, dus. Een schat aan wetenschappelijke informatie, gevangen in de nauwkeurigste foto ooit.

Het aantal zwarte gaten dat de Event Horizon Telescope kan fotograferen is beperkt. Inmiddels zijn ook opnames van het zwarte gat in onze Melkweg verschenen en van de omgevingen van een viertal andere objecten. Er worden nog altijd telescopen aan het netwerk toegevoegd, waardoor de precisie van de metingen toeneemt. Het bereiken van een hogere resolutie is lastig, want daarvoor is een effectieve spiegel no-



Figuur 4. Een van de spiegels van de Very Large Telescope. Het gat in het midden, dat gebruikt wordt om het licht naar de meetapparatuur te zenden, vermindert de lichtopbrengst iets, maar heeft geen invloed op de resolutie van de telescoop. Foto: ESO/G. Huedepohl.



Figuur 5. Het netwerk van de Event Horizon Telescope. De gele locaties maakten de allereerste foto; de oranje locaties zijn inmiddels ook in gebruik, en er zijn plannen om ook de blauwe locaties aan het netwerk te koppelen. Afbeelding: EHT Collaboration.

dig, groter dan de aarde zelf. Er wordt wel gespeculeerd over het op soortgelijke wijze koppelen van ruimtetelescopen, maar heel concreet en uitvoerbaar zijn zulke plannen nog niet.

...en de quantummechanica?

De metingen met zwaartekrachtgolven en de Event Horizon Telescope zijn vooral nog vooral interessant voor het testen van Einsteins algemene relativiteitstheorie. Niet alleen weten we nu dat zwarte gaten bestaan, er is ook gebleken dat de ruimtetijd zich daar precies gedraagt zoals Einstein

voorspelde. Kunnen we nu ook verder gaan? Een grote vraag uit de theoretische natuurkunde is hoe de algemene relativiteitstheorie en de quantummechanica samengaan. Beide theorieën moeten een rol hebben gespeeld bij het ontstaan van ons heelal, en doen dat ook rond zwarte gaten. Kunnen we uit de huidige metingen iets leren over quantumzwaartekracht? Helaas niet. Voor de Event Horizon Telescope lijkt het onhaalbaar om quantuminformatie te verkrijgen; die zou vooral rond de horizon van een zwart gat te vinden moeten zijn,

en zoals gezegd zien we op foto's effecten die zich zo'n vijf keer zo ver weg afspelen. Voor zwaartekrachtgolven is het plaatje iets rooskleuriger, zeker als de eerder beschreven ruimtetelescoop LISA in de toekomst gerealiseerd wordt. De grotere nauwkeurigheid en het feit dat we daarmee zwaartekrachtgolven uit het vroege heelal kunnen opvangen, bieden mogelijkheden om in elk geval bepaalde theoretische modellen van quantumzwaartekracht uit te sluiten als de metingen niet met zulke modellen overeenkomen. Directere metingen zijn wellicht ook mogelijk; zo rekenden de Nederlandse natuurkundige Erik Verlinde en zijn Amerikaanse collega Kathryn Zurek in 2019 uit dat de kwantisatie van de ruimtetijd zelf zou kunnen leiden tot effecten die in de trillingen van zwaartekrachtdetectoren net meetbaar kunnen zijn.

We kunnen de vraag ook andersom stellen: zijn er aardse experimenten mogelijk waarmee we quantum-effecten op de zwaartekrachtwetten kunnen meten, om zo meer te leren over zwarte gaten? Een interessant idee is dat van natuurkundigen Ludovico Lami, Julen Pedernales en Martin Plenio, die zich afvragen of je de zwaartekracht kunt meten tussen heel lichte massa's, in de ordegrrootte van een kilogram, en daarin quantum-effecten kunt ontdekken. Ze tonen aan dat dat met een slimme opstelling, waarin je juist probeert de quantummechanica zo veel mogelijk uit te sluiten, mogelijk zou kunnen zijn. De zo opgedane kennis zou ons dan iets leren over wat zich op de allerkleinste schaal rond zwarte gaten afspeelt. Het is nog een flinke stap naar experimenten waarin we het quantumgedrag van zwarte gaten kunnen bepalen, maar natuurkundigen zijn volhardend en de techniek blijft voortschrijden. Een eeuw na de eerste theoretische aanwijzingen voor het bestaan van zwarte gaten kunnen we die objecten in veel meer detail waarnemen dan ooit voor mogelijk werd gehouden. Wat zullen we in de komende eeuw ontdekken over deze machtig interessante hemellichamen? De tijd zal het leren.