



Interview natuurkundige
Jo van den Brand

Hoe meet je zwaartekrachtgolven?

De Einsteintelecoop gaat minieme trillingen meten in de lege ruimte, veroorzaakt door extreme verschijnselen zoals botsende zwarte gaten aan de rand van het waarneembare heelal. Hoe krijgt het ondergrondse instrument dat voor elkaar? *Eos* sprak met een van de initiators van het ambitieuze project, natuurkundige Jo van den Brand.

Aan zijn tongval kun je het nog horen: Jo van den Brand is geboren en getogen in het zuiden van de Nederlandse provincie Limburg. Zijn grote droom: dat dáár, onder het glooiende heuvellandschap rond het Drielandpunt, de Einsteintele-scoop gebouwd gaat worden. De Nederlandse overheid heeft inmiddels 42 miljoen euro beschikbaar gesteld om het bod voor de bouw van de gigantische zwaartekrachtgolfdetector verder te optimaliseren. ‘Maar Sardinië is ook nog steeds in de race’, zegt Van den Brand. ‘Over twee jaar verwacht ik de beslissing over de locatie; midden jaren dertig moet de Einsteintele-scoop operationeel zijn.’

Van den Brand begon zijn wetenschappelijke carrière als deeltjesfysicus en was lange tijd verbonden aan het Nationaal instituut voor subatomaire fysica (Nikhef) in Amsterdam. In 2006 switchte hij naar de bestudering van zwaartekrachtgolven, inmiddels de grootste onderzoeksgroep bij Nikhef. De laatste jaren voor zijn pensioen (in november 2020) was Van den Brand hoogleraar zwaartekrachtgolven en fundamentele natuurkunde aan de Universiteit van Maastricht. ‘Ik hou van precieze theorieën en experimenten’, zegt hij. ‘De combinatie van fundamentele fysica en astronomie is adembenemend interessant.’

Dat bleek wel op 14 september 2015, toen de twee LIGO-zwaartekrachtgolfdetectoren in de Verenigde Staten voor het eerst de onvoorstelbaar kleine rimpelingen in de ruimte opvingen van botsende zwarte gaten op 1,3 miljard lichtjaar afstand van de aarde – een revolutionaire ontdekking die in 2017 beloond werd met de Nobelprijs Natuurkunde voor drie belangrijke pioniers van het vakgebied: Rainer Weiss, Barry

Barish en Kip Thorne. Inmiddels zijn er tientallen soortgelijke botsingen waargenomen door LIGO en de Europese Virgo-detector in Italië, en is ook de Japanse KAGRA-detector in bedrijf genomen.

De toekomstige Einsteintele-scoop (ET), genoemd naar de visionaire wetenschapper die het bestaan van zwaartekrachtgolven ruim honderd jaar geleden al voorspelde, is de logische opvolger van LIGO, Virgo en KAGRA. En hoewel hij aanzienlijk groter en gevoeliger wordt, werkt hij volgens precies hetzelfde principe: interferometrie, oftewel de interactie van twee lichtgolven met exact dezelfde golflengte. Als de golftoppen van de afzonderlijke lichtgolven samenvallen, is er sprake van versterking van het signaal (constructieve interferentie); als ze ‘uit fase’ zijn (de ‘pieken’ van de ene lichtgolf vallen dan samen met de ‘dalen’ van de andere), doven ze elkaar uit – destructieve interferentie.

Bundelsplitser

In de basis is de werking van een zwaartekrachtgolfdetector heel simpel. Een laserstraal wordt met behulp van een zogeheten bundelsplitser (een halfdoorlatende spiegel) in twee lichtbundels gesplitst. Die kaatsen in twee verschillende richtingen op en neer tussen trillingsvrij opgehangen spiegels aan de uiteinden van kilometerslange vacuümtunnels. ‘De apparatuur wordt zó afgesteld dat de twee lichtbundels elkaar uitdoven wanneer ze elkaar weer ontmoeten’, legt Van den Brand uit. ‘Normaal gesproken zie je dus geen signaal. Maar als er een zwaartekrachtgolf langskomt, zijn de lichtgolven niet langer exact in fase, en meet je een klein beetje licht.’

De oorzaak: een passerende zwaartekrachtgolf veroorzaakt een

heel snelle variatie in de lengte van de tunnels. Een paar honderd keer per seconde worden die een piepklein beetje langer en korter. Omdat de twee armen verschillend georiënteerd zijn, gaat dat niet synchroon. De volmaakte destructieve interferentie raakt daardoor verstoord, en een paar honderd keer per seconde sijpelt er opeens wél wat licht door naar de detector.

Het grote probleem daarbij is dat die lengtevariaties onvoorstelbaar klein zijn, in de orde van een miljardste nanometer – een duizendste van de diameter van een waterstofatoomkern. De golflengte van de gebruikte lasers is 1.064 nanometer, zodat de minieme ruimtetrillingen maar een zeer geringe verandering van het interferentiepatroon veroorzaken. Dat betekent dat slechts een extreem kleine fractie van het licht wordt doorgelaten. ‘Je hebt dus heel veel licht nodig om dat dan toch te kunnen meten’, aldus Van den Brand. ‘Daarom kaatst het laserlicht eerst een paar honderd keer op en neer in de tunnels, en vindt er elders in de detector ook nog zogeheten *power recycling* plaats. Alles bij elkaar wordt de laserbundel daardoor ruim twintigduizend keer zo intens.’

De huidige zwaartekrachtgolfdetectoren LIGO en Virgo zijn goed in staat om relatieve lengtevariaties van een honderdtriljoenste van een procent (een factor 10⁻²²) te meten. Daarmee zijn het verreweg de gevoeligste meetinstrumenten die ooit zijn gebouwd. Van den Brand heeft een paar voorbeelden paraat om die extreme precisie aanschouwelijk te maken, of althans om daar een poging toe te doen. De dikte van een mensenhaar op de afstand tot de dichtstbijzijnde ster bijvoorbeeld. Of een honderdduizendste van de stijging van het waterniveau in het

IJsselmeer als je er één extra druppel in laat vallen. ‘Maar’, zegt hij, ‘ik kan daar zelf eigenlijk niks mee; het helpt mij niet. Dat soort vergelijkingen zeggen gewoon niet zo veel.’

Om de extreem hoge meetgevoeligheid te halen, moet je natuurlijk wel alle denkbare verstoringen uit de omgeving weg zien te filteren. De spiegels in een zwaartekrachtgolf-detector worden daartoe aan dunne glazen draadjes opgehangen in een soort omgekeerde slingerconstructie die de meeste omgevingstrillingen al vrijwel volledig dempt. Via een ingenieus terugkoppelmechanisme, bestaande uit kleine magneetjes aan de achterzijde van de spiegels met vlak daarachter elektrische spoeltjes, wordt het instrument vervolgens ‘gelocked’ (althans, zo gebeurt het in Virgo; de Amerikaanse LIGO-detector maakt hiervoor gebruik van elektrostatische technieken).

Gelukkig hebben de meeste storende trillingen veel lagere frequenties dan de zwaartekrachtgolven waar wetenschappers jacht op maken.

Dankzij al die technieken – nog aangevuld met esoterische trucjes uit de quantumfysica die de fotonruis in de detector onderdrukken – hebben LIGO en Virgo de afgelopen jaren maar liefst 90 zwaartekrachtgolven geregistreerd, afkomstig van botsingen tussen zwarte gaten en (in enkele gevallen) compacte neutronensterren. De Japanse KAGRA-detector maakt sinds november 2019 ook deel uit van het internationale samenwerkingsverband. De derde ‘*observing run*’ (O3) eindigde in maart 2020; dit voorjaar (2023) gaat O4 van start, en volgen er ongetwijfeld opnieuw vele tientallen detecties. Met zo’n succesvolle staat van dienst begin je je af te vragen waarom natuurkundigen kennelijk nog steeds niet tevreden zijn. Vanwaar die behoefte

aan een nóg gevoeliger instrument?

Voor Van den Brand is de bouw van de Einsteintelecoop echter de logische volgende stap. ‘De tijd van de eerste ontdekkingen is voorbij’, zegt hij; ‘je wilt nu echt alle zwartegatenbotsingen in het heelal waarnemen.’ De huidige generatie detectoren registreert botsingen die op zulke grote afstanden plaatsvonden dat de resulterende zwaartekrachtgolven miljarden jaren onderweg zijn voordat ze op aarde aankomen. Je bent dan dus getuige van gebeurtenissen die miljarden jaren geleden plaatsvonden. ‘Maar eigenlijk wil je nog veel verder terugkijken in de tijd,’ zegt Van den Brand, ‘tot vlak na de oerknal.’ Zo kom je meer te weten over de allereerste zwarte gaten in het universum, en dus over de allereerste evolutie van het heelal.

Langere armen

Om dat te bereiken, moet de Einsteintelecoop veel gevoeliger zijn dan zijn voorgangers. Bovendien moet hij in staat zijn om zwaartekrachtgolven met een veel lagere frequentie te detecteren. Een zwaartekrachtgolf met een frequentie van 150 hertz (150 trillingen per seconde) die in de prille jeugd van het heelal plaatsvond, reist bijna veertien miljard jaar lang door het uitdijende heelal. De golven worden daardoor enorm opgerekt, en tegen de tijd dat ze op aarde aankomen, is hun frequentie afgenomen tot 1,5 hertz. Van den Brand: ‘Je hebt dus een heel grote gevoeligheid op lage frequenties nodig – ongeveer tienduizend keer beter dan wat LIGO en Virgo op die frequenties halen. Dat is ongelooflijk moeilijk.’

De Einsteintelecoop moet dat voor elkaar krijgen door een combinatie van drie verbeteringen: hij wordt (net als de Japanse KAGRA-



Jo van den Brand: ‘De tijd van de eerste ontdekkingen is voorbij, je wilt nu echt alle zwartegatenbotsingen in het heelal waarnemen.’

detector) ondergronds gebouwd; hij krijgt langere armen, en de spiegels worden gekoeld tot zo’n 10 graden boven het absolute nulpunt (-263°C). Door het hele instrument op een paar honderd meter onder het aardoppervlak te bouwen, heb je veel minder last van storende trillingen uit de omgeving – vooropgesteld dat de ondergrond zelf vrijwel geen seismische activiteit vertoont. Op enkele kleine, incidentele aardshokken na is dat rond het drielandenpunt van Nederland, België en Duitsland inderdaad het geval. Bovendien levert de toplaag van löss (piepkleine klei- en leemdeeltjes, lang geleden afgezet door de wind) een extra dempende werking.

Wat de armlengte betreft: hoe groter die is, hoe eenvoudiger het wordt om een relatieve lengtevariatie van pakweg 10-24 te meten. LIGO heeft twee armen van vier kilometer lang; Virgo en KAGRA hebben beide een armlengte van drie kilometer. De armen van de Ein-

steintelefoon moeten echter tien kilometer lang worden. Volgens Van den Brand zou je ze het liefst nog langer maken, maar dan moet je ook veel langere tunnels boren, en wordt je vacuümsysteem veel groter. De totale kosten van het instrument zouden daarmee de pan uitrijzen. Die worden nu geraamd op een kleine twee miljard euro – 900 miljoen voor het graven van de tunnels, 560 miljoen voor het vacuümsysteem, circa 200 miljoen voor de huidige voorbereidingsfase, en ‘slechts’ 230 miljoen voor de eigenlijke detector.

Door de spiegels diep te koelen (en zwaarder te maken) onderdruk je de zogeheten thermische ruis, wat ook ten goede komt aan de gevoeligheid van het instrument. De extreem lage temperatuur betekent wel dat de spiegels niet allemaal van kwarts (of saffier) gemaakt kunnen worden, zoals bij de huidige detectoren; in plaats daarvan krijgt de Einsteintelefoon ook spiegels van zuiver silicium. ‘Het klinkt allemaal eenvoudig’, zegt Van den Brand, ‘maar dat is het bepaald niet. We zijn heel innovierend, maar het is daardoor een enorme uitdaging.’ Ter vergelijking: de Cosmic Explorer, de toekomstige Amerikaanse tegenhanger van de Einsteintelefoon, komt gewoon bovengronds te staan, en maakt geen gebruik van diepgekoelde spiegels. De gewenste hoge gevoeligheid hoopt men daar te bereiken dankzij een armlengte van maar liefst twintig tot veertig kilometer.

Een ander uniek aspect van de Einsteintelefoon is dat er niet gewerkt wordt met één interferometer, maar met zes. Het instrument krijgt de vorm van een gigantische driehoek met zijden van tien kilometer. Elk hoekpunt biedt plaats aan de bundelsplitters van twee interferometers, en aan de ‘eindspiegels’ van

de in totaal vier interferometers in de andere twee hoekpunten. Drie van de zes interferometers worden geoptimaliseerd voor het meten van laagfrequente zwaartekrachtgolven. Anders gezegd: terwijl LIGO, Virgo en KAGRA een rechthoekige L-vorm hebben (twee lange armen onder een hoek van 90 graden, met de laser, de bundelsplitser en de feitelijke detector in het hoekpunt), bestaat de Einsteintelefoon straks uit drie onderling overlappende L's met tien kilometer lange armen onder een hoek van 60 graden, en met in elk hoekpunt twee volwaardige interferometers.

Die driehoekige configuratie maakt het mogelijk om ook de polarisatiegraad en -richting van zwaartekrachtgolven te meten. Zo hopen astronomen meer te weten te komen over de rotatierichting en de ruimtelijke oriëntatie van de botsende zwarte gaten. Een ander voordeel, volgens Van den Brand, is dat je uit de metingen van twee interferometers kunt voorspellen wat de derde zou moeten zien. ‘Dat biedt een extra check, waarmee je de signaal-ruisverhouding verder kunt verbeteren.’

Op papier ziet het er allemaal heel veelbelovend uit, maar het gaat om onwaarschijnlijk ingewikkelde technieken. Die worden binnenkort stuk voor stuk verder ontwikkeld en uitgetest in ETPathfinder, een klein prototype van de Einsteintelefoon met armen van slechts twintig meter

lang (zie het artikel op pg. 52 van dit themanummer). Heel belangrijk, aldus Van den Brand, ‘al zul je met ETPathfinder geen zwaartekrachtgolven kunnen detecteren, vanwege de kleine afmetingen.’

ETPathfinder staat in Maastricht, maar of de Einsteintelefoon zelf ook in de grensstreek van Nederland en België gebouwd zal worden, staat nog niet vast. Sardinië is ook nog steeds een serieuze kandidaat. ‘De Italianen hebben een eiland van graniet in een aardbevingsvrij gebied’, zegt Van den Brand, ‘maar ik ben er niet van overtuigd dat die locatie beter is dan de onze. Wij moeten nog goed uitzoeken wat de kosten en de risico's zijn, maar ik heb goede hoop. Er is hier al ervaring met het boren van lange tunnels: tussen Luik en Aken ligt de 6,5 kilometer lange tunnel van Soumagne voor de Belgische hogesnelheidslijn.’

Nadat de keuze voor de locatie is gemaakt (in het gunstigste geval in 2025), zal het vermoedelijk nog een jaar of twee duren voordat de graafwerkzaamheden daadwerkelijk kunnen aanvangen. De constructie van de tunnels, de bouw van het gigantische vacuümsysteem en de installatie van alle apparatuur vergen vervolgens naar schatting nog eens acht jaar. Jo van den Brand zal nog lang geduld moeten hebben voordat de Einsteintelefoon zijn eerste waarnemingen gaat doen. ‘Op z'n vroegst in 2035 is-ie klaar.’ ■

Technieken worden binnenkort stuk voor stuk verder ontwikkeld en uitgetest in ETPathfinder, een klein prototype van de Einsteintelefoon