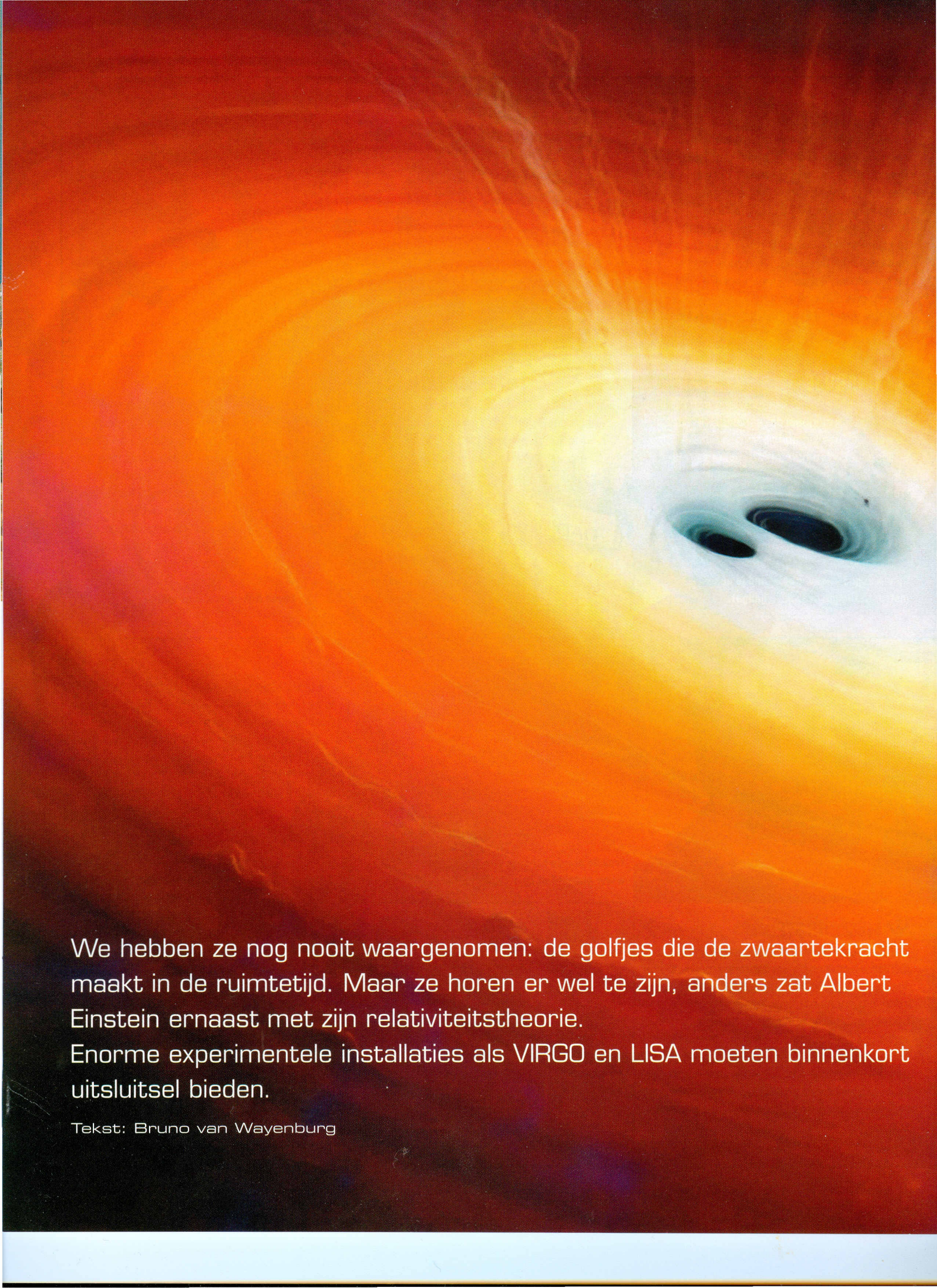




We hebben ze nog nooit waargenomen: de golfjes die de zwaartekracht maakt in de ruimtetijd. Maar ze horen er wel te zijn, anders zat Albert Einstein ernaast met zijn relativiteitstheorie.

Enorme experimentele installaties als VIRGO en LISA moeten binnenkort uitsluitsel bieden.

Tekst: Bruno van Wayenburg

Als twee zwarte gaten botsen, komen daar volgens Albert Einsteins relativiteitstheorie zogenoemde zwaartekrachtsgolven bij vrij. Dit soort golven waarnemen is een hele kunst. Maar detectors als de Frans-Italiaanse VIRGO zouden ertoe in staat moeten zijn.

Rimpels in de ruimtetijd

HOE WERKT VIRGO?

1 De Frans-Italiaanse interferometer VIRGO dient om zwaartekrachtsgolven op het spoor te komen. In dit enorme apparaat schijnt een laser van 20 watt (links) op een halfdoorlatende spiegel, die dit licht splitst in twee bundels (midden). Beide gaan door een tunnel van 3 kilometer, om teruggekaatst te worden door supergladde, trillingsvrij opgehangen spiegels (boven en rechts).

2 Twee halfdoorlatende spiegels aan het begin van de armen laten het laserlicht een aantal keer heen en weer kaatsen. Hierdoor wordt de effectieve lengte van de armen zo'n 100 kilometer, wat de gevoeligheid van VIRGO ten goede komt.

1 laser



halfdoorlatende spiegel

3 kilometer

2 halfdoorlatende spiegel

2 halfdoorlatende spiegel

spiegel

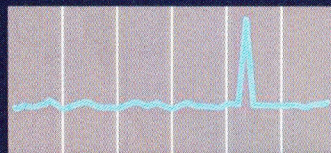
2

3 kilometer

3 De twee lichtbundels, afkomstig van de spiegels, worden weer bij elkaar gevoegd. Normaal gesproken doven ze elkaar uit: de toppen van de ene lichtgolf vallen precies samen met de dalen van de andere, waardoor de detector geen signaal ziet (destructieve interferentie). Passeert er een zwaartekrachtsgolf, dan veranderen de afmetingen van de armen eventjes, waardoor de bundels elkaar niet meer uitdoven en er een signaal gemeten wordt.



detector



Albert Einstein zelf dacht dat ze nooit waargenomen zouden worden: de zwaartekrachtsgolven die zijn eigen algemene relativiteitstheorie uit 1916 voorspelde. Gemakkelijk is zo'n meting dan ook niet. Een door de aarde passerende zwaartekrachtsgolf veroorzaakt een tijdelijke vervorming die net zo klein is ten opzichte van de breedte van je hand, als de breedte van je hand is ten opzichte van de afstand tussen de aarde en de ster Proxima Centauri.

Aan de andere kant: Einstein heeft nooit VIRGO en LIGO gezien, de kilometers grote optische meetinstrumenten in Italië en de Verenigde Staten die deze golven toch moeten gaan waarnemen. Wie komt aanrijden over de vlaktes bij het Italiaanse Cascina, ten zuid-

oosten van Pisa, ziet tussen de graanvelden een enorme blauwe buis van golfplaten opdoemen, die al snel de complete horizon vult. En dat is nog maar een van de twee armen van VIRGO. Beide zijn drie kilometer lang, en vergelijkbaar met de vier kilometer lange poten van de twee LIGO-detectors in het Amerikaanse Hanford (in de staat Washington) en Livingston (Louisiana).

Alle drie zijn het gigantische optische installaties, waarin krachtige, precieze laserbundels heen en weer kaatsen in vacuümgezogen buizen. Dit is *big science*, de overtreffende trap van wetenschap, met miljoeneninvesteringen en honderden onderzoekers en technici. En vanaf volgend jaar zouden ze hun eerste zwaartekrachtsgolf moeten gaan zien.

BOODSCHAPPERGOLVEN

Om bij het begin te beginnen: met zijn speciale relativiteitstheorie uit 1905 had Einstein ruimte en tijd gepromoveerd tot deelnemers aan de natuurkunde. Daarvoor werden ze gezien als een neutraal podium waarop de 'echte natuurkunde' zich afspeelde. Maar volgens Einstein krompen voorwerpen in lengte en tikken hun klokken voortbewegen.

In 1916 ging hij met zijn algemene relativiteitstheorie nog een stap verder. De 'ruimtetijd' werd daarin een soort elastiek dat kan rekken, krimpen en buigen. Einstein verklaarde de zwaartekracht door te stellen dat elk object met een massa de ruimtetijd vervormt. Een ster doet dat bijvoorbeeld, en daardoor blijven de planeten die om hem

heen cirkelen in hun baan. Niet dat er in de dagelijkse praktijk nu zo verschrikkelijk veel veranderde. Vallende appels en planeten bleven dezelfde banen beschrijven, vrijwel helemaal volgens Newton. Einsteins kromme-ruimtetijd-wiskunde leverde vooral kleine afwijkingen op, maar ook een paar radicale nieuwigheden. Het zwarte gat bijvoorbeeld, een concentratie van massa die zo sterk is dat niets de zuigende werking ervan kan weerstaan, zelfs licht niet. Een andere voorspelling zijn de zwaartekrachtsgolven: rimpelingen in het elastiek van de ruimtetijd. Het zijn de boodschappergolven waarmee het nieuws van een verandering in zwaartekracht zich door de ruimte verspreidt. Denk aan een botsing tussen zwarte gaten of een supernova, een explosie van een zware ster.

Het bestaan van zwaartekrachtsgolven werd in 1974 aangetoond door natuurkundige Russell Hulse en sterrenkundige Joseph Taylor, die onderzoek deden aan de pulsar PSR B1913+16, een neutronenster

DIT IS DE OVERTREFFENDE TRAP VAN WETENSCHAP, MET MILJOENENINVESTERINGEN EN HONDERDEN ONDERZOEKERS EN TECHNICI



die radiosignalen uitzendt. (Een neutronenster is een heel compacte, zware ster die alleen uit neutronen bestaat.) De pulsar bleek in korte baan om een andere ster heen te bewegen en zond daarvoor krachtige zwaartekrachtsgolven uit. Hulse en Taylor wisten aan te tonen dat die baan steeds korter werd, wat precies te verklaren was met het wegvoeren van draaiingsenergie door de zwaartekrachtsgolven.

GESPLITST LICHT

Maar een zwaartekrachtsgolf direct betrappen is nog altijd niet gelukt. En niet doordat het niet geprobeerd is. Al eind jaren zestig bouwde de Amerikaanse natuurkundige Joseph Weber (1919-2000) grote metalen staven die door een passerende zwaartekrachtsgolf in trilling gebracht zouden worden, als een gigantische stemvork. Eind jaren zeventig meende hij ook echt zwaartekrachtsgolven gedetecteerd te hebben. Maar zelfs volgens de meest optimistische theorieën zou dat niet kunnen, oor-

deelden zijn collega's. Weber bleef vasthouden aan zijn claim, en veranderde daardoor van een alom gerespecteerde pionier in een verbitterde buitenstaander.

Daarna werden de staven groter en met helium gekoeld om trillingen tegen te gaan. In de jaren negentig begon de Leidse natuurkundige Georgio Frossati met de bouw van een bolvormige 'staaf' van een koper-aluminiumlegering, de Mini-Grail. Maar deze staven zijn slechts gevoelig voor golven met een of enkele frequenties en hebben tot nu toe nog geen onbetwiste gravitatiegolven opgepikt.

VIRGO en LIGO zijn van een heel andere orde van grootte, al is het principe tamelijk simpel. In het centrale station, waar de armen samenkomen, wordt laserlicht van 20 watt met een halfdoorlatende spiegel gesplitst in twee bundels. Elke bundel gaat naar een arm, om aan het eind van de vacuümtunnel terug te kaatsen tegen een spiegel. In het centrale gebouw worden de twee terugkaatsende bundels weer samengevoegd. Normaal gespro-

ken is de interferometer zo afgesteld dat de terugkerende toppen van de lichtgolf die door de noordelijke arm gestuurd werd, precies samenvallen met de dalen van de lichtgolf uit de westelijke arm. Dat geeft *destructieve interferentie*: de bundels doven elkaar uit en de detector ziet geen signaal (zie ook 'Hoe werkt VIRGO?', pagina 44). Dat verandert als er een gravitatiegolf passeert. Volgens Einsteins theorie gebeurt er dan heel even iets met de afmetingen van de armen. Eerst rekt de interferometer op in de noordelijke richting en krimpt hij in de oostelijke, daarna juist andersom. Een moment is de afstelling van de laserbundels daarvoor verstoord, en eventjes doven ze elkaar niet meer uit: er is een signaal!

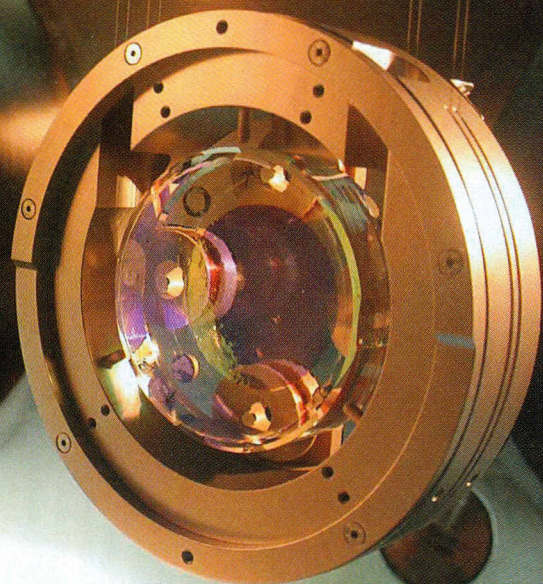
ZALEN VOL TECHNIEK

Het principe mag simpel zijn, maar de praktijk blijkt hels lastig. We hebben het over een oprekking en inkrimping van een fractie van de dikte van een atoomkern, terwijl de interferometer ook nog eens om

↑ VIRGO vanuit de lucht. Deze enorme detector voor gravitatiegolven is te vinden bij de Italiaanse plaats Cascina, ten zuidoosten van Pisa.

tientallen andere redenen trilt: van seismische trillingen via warmte-trillingen tot trillingen veroorzaakt door voorbijrijdende trucks. In VIRGO hangt daarom iedere extreem gladde, gecoate spiegel aan een tien meter hoge 'omgekeerde slinger', een toren van hydraulische veren. De spiegel is daarin opgehangen aan een zogenoemde superattenuator, een soort ketting van vijf dempende gewichten, die trillingen honderd miljard keer zwakker maken.

Het licht beweegt door vacuümgezogen buizen van 1,2 meter doorsnee, waarmee VIRGO en LIGO de grootste vacuümsystemen ter wereld zijn. De armen van de interferometer moeten zo lang mogelijk zijn, zodat een kleine relatieve oprekking zich vertaalt in een zo groot mogelijk verschil. Drie à vier



De door Nikhef aangeleverde spiegel voor de Input Mode Cleaner van VIRGO. De koperkleurige metalen ring hangt met vier rekvrije draadjes aan een zogenoemde superattenuator, die storende trillingen verzwakt. In de ring hangt de spiegel zelf, die doorzichtig is voor alle golflengtes behalve die van de VIRGO-laser.



kilometer is daarbij wel zo'n beetje het maximum. Daarboven gaat de kromming van de aarde meespelen en hangen de spiegels niet meer helemaal recht ten opzichte van elkaar.

Van die drie kilometer maken de ontwerpers er honderd, door de bundels binnen de buizen tientallen keren heen en weer te laten kaatsen. Dat doen ze met een extra set halfdoorlatende spiegels aan het begin van de buizen. Door die truc wordt het effectieve vermogen van de laserbundel wel honderden watt in plaats van twintig. Dat laat de halfdoorlatende spiegels niet koud; ondanks hun optische per-

fectie absorberen ze toch een miljoenste deel van het laserlicht. Dus warmen ze op, vooral in het midden, waar de bundel het felst is. Daarom zijn er plannen om de buitenste ring van de spiegel ook te verhitten, met laserlicht van een andere golflengte, zodat de verwarming in ieder geval gelijkmatig is en de vervorming van de spiegel minder. Zo lokt de ene technische verbetering de andere uit, in een wapenwedloop tegen de ruis en de onvolkomenheden van materiaal en instrument. En zo groeit een simpel basisprincipe uit tot enorme zalen vol optica, elektronica, vacuümapparatuur en computers,

zorgvuldig gepamperd door tientallen technici en onderzoekers. En dat allemaal om alleen die ene trilling over te houden. In Italië heeft VIRGO zelfs last van de golven die op het strand bij Pisa slaan. De directeur maakt zich zorgen over de aanplant van bomen. Als het waait, geeft dat extra trillingen. Gelukkig gaan de plannen voor windmolens in de buurt niet door.

UPGRADES

Bij projecten als VIRGO en LIGO kost het inregelen en troubleshooten van de gebouwde detector (*commissioning*) met gemak een jaar. Pas daarna komen de echte



De Nederlandse spiegel voor de Input Mode Cleaner van de VIRGO-detector wordt met de grootst mogelijke voorzichtigheid vervoerd door twee onderzoekers

meetcampagnes; de eerste voor LIGO in 2002, die voor VIRGO vorig jaar, weer gevolgd door prutsen en klussen.

Met de 'instapmodellen' van beide detectors is inmiddels de ontwerpgevoeligheid gehaald. Zonder een enkel signaaltje, maar dat zou ook wel heel veel geluk geweest zijn. Gek genoeg is er toch al een 'resultaat' van LIGO binnen. In

VLAG VAN VIJF MILJOEN

"Ze vroegen of we onze eigen vlag op het terrein wilden; dat zou maar vijf miljoen euro kosten." Jo van den Brand van het Nikhef kan wel lachen om het aanbod dat Nederland kreeg om de derde partner te worden in het Frans-Italiaanse VIRGO-project. Van den Brand is hoogleraar bij Nikhef, het Amsterdamse instituut voor hoge-energiefysica. Hij en collega's installeerden afgelopen zomer een spiegel voor de Input Mode Cleaner van VIRGO. Dat is een soort optisch voorfilter dat de laserbundel voor gebruik van de laatste ongerechtigheden ontdoet. Net als bij andere spiegels ging het om een operatie van dagen in de hete, ultraschone

vacuümruimte, met dikke *clean-room*-pakken en tergend trage handelingen om maar niets te beschadigen of vies te maken. De spiegel was ook de eerste buitenlandse hardwarebijdrage aan het project. Verder doet Nikhef mee aan het computersimulatieonderzoek om beter naar sporen van zwaartekrachtgolven te kunnen zoeken in de VIRGO- en LIGO-gegevens. Voor een instituut is het een goede gelegenheid om de horizon te verbreden naar de 'astrodeeltjesfysica'. Maar om nu meteen vijf miljoen op te hoesten, is ook weer zoiets. Voorlopig waait in Cascina naast de Franse en de Italiaanse dus alleen nog de Europese vlag.

ALS DE DETECTORS NIETS ZIEN, IS ER IETS VREEMDS AAN DE HAND MET EINSTEINS THEORIE

februari 2007 vond er in de richting van het nabijgelegen sterrenstelsel Andromeda een felle gammaflits (*gamma ray burst*) plaats, een gevolg van een zware, imploderende ster. Het feit dat LIGO toen niets zag, toonde aan dat de gebeurtenis verder weg gebeurd moet zijn dan in het Andromedastelsel. Nu werken de teams van beide detectors aan hun eerste upgrades, VIRGO Plus en Enhanced LIGO. Als die volgend jaar online komen, neemt de gevoeligheid met een factor twee tot drie toe. Dat betekent dat de bol rond de aarde waarin gebeurtenissen gezien worden acht keer zo groot wordt. Dan zou er volgens de beste inzichten toch zo'n paar keer per jaar wel iets te zien moeten zijn. Het eerst worden zwaartekrachtsgolven verwacht van botsende

zwarte gaten, of van onregelmatigheden, 'bergen', op nabijgelegen draaiende pulsars, zoals die in de Krabnevel.

NIEUWE STERRENKUNDE

In 2014 moeten de volgende stappen online komen: Advanced LIGO en Advanced VIRGO (waarvan de Europese versie overigens nog niet gefinancierd is). Tien keer gevoeliger, dus duizend keer meer kandidaat-gebeurtenissen. Als er dan nog niets gezien wordt, zeggen de onderzoekers, is er echt iets eigenaardigs aan de hand met Einsteins theorie, wat natuurlijk ook nog altijd kan. Het blijft wetenschap. Zoniet, dan zien VIRGO en LIGO ongeveer een signaal per dag of week. Rond dezelfde tijd lanceren de NASA en de ESA LISA, drie ruimtescheepjes die samen zwaarte-

↑ Afbeelding van een dubbelpulsar, de superzware, ineengestorte kernen van voormalige sterren. Deze pulsars draaien om elkaar heen en zenden daarbij zwaartekrachtgolven uit (de blauwe pijlen rechtsonder). Daardoor verliest het systeem energie, voorspelt Einsteins algemene relativiteitstheorie, wat ervoor zorgt dat de banen van de pulsars langzaam kleiner worden. Deze voorspelling is inmiddels bevestigd.

krachtsgolven met een lagere frequentie zichtbaar moeten maken, afkomstig van bijvoorbeeld zware, botsende zwarte gaten. Op aarde zijn deze golven onzichtbaar door seismische trillingen. Inmiddels liggen de opvolgers al weer op de tekentafel. De toepasselijk genaamde Einstein Telescope is een zwaartekrachtsgolven-detector op enkele honderd meters diepte, bijvoorbeeld in de Limburgse kolenmijnen. Ondergronds zijn storende seismische trillingen kleiner, en om warmtetrillingen te

onderdrukken zijn de spiegels gekoeld tot enkele graden boven het absolute nulpunt (-273,15 graden Celsius). De financiering van zo'n 400 tot 500 miljoen euro moet wel nog even rond komen. Inmiddels gaat het dan al lang niet meer om het aantonen van Einsteins gelijk, maar om het bedrijven van een nieuwe soort sterrenkunde, niet met licht maar met zwaartekrachtsgolven. Daarmee kun je zwarte gaten, supernova's en neutronensterren onderzoeken. Mogelijk zijn ook overblijfselen te vinden van zwaartekrachtsgolven die na de oerknal in het heelal zijn blijven rondvliegen. En misschien is er iets te zien van de nog onbegrepen donkere materie, een onzichtbaar maar aantoonbaar ingrediënt van het heelal. Of, wie weet, nog volledig onbekende verschijnselen, die zelfs Einstein nooit had kunnen vermoeden.

INTERNET

Ga voor de geraadpleegde sites naar www.kijk.nl/links.