

# Detectie van zwaartekrachtgolven

## Het wereldwijde LIGO-Virgo-netwerk van interferometers

**Recente gezamenlijke waarnemingen van gravitatiegolven van fuserende zwarte gaten en neutronensterren hebben het potentieel van een wereldwijd netwerk van interferometers aangetoond. De ongeken- de nauwkeurigheid in de bronlokalisatie, bereikt met een netwerk van slechts drie detectoren, heeft *multimessenger*-astrofysica tot realiteit gemaakt. Dit artikel geeft een overzicht van het meetprincipe en de instrumentatie van de detector en blikt vooruit op het traject naar een zo hoog mogelijke gevoeligheid in de komende jaren.** Alessandro Bertolini en Eric Hennes

396

**D**e ontdekking van zwaarte- krachtgolven afkomstig van fuserende zwarte gaten in 2015 en 2016 [1,2] is dit jaar beloond met de Nobelprijs voor de Natuur- kunde; zie het artikel van Chris Van Den Broeck op pagina 392. Maar daar is het niet bij gebleven! De twee LIGO-detectoren in de Verenigde Sta- ten en de Virgo-detector bij Pisa in

Italië (figuur 1) hebben in augustus 2017 hun eerste gezamenlijke obser- vaties uitgevoerd. Er is dus voor het eerst gemeten met drie detectoren in plaats van twee. Op de veertiende werden gravitatiegolven (GW: *gravi- tational wave*) afkomstig van het sa- mensmelten van twee zwarte gaten (GW170814) waargenomen door alle drie interferometers [3]. Het meet- signaal duurde ongeveer 0,1 seconde en was het eerste sig- nificante GW-signaal ooit vast- gelegd door Virgo. Drie dagen later werd voor het eerst de fu- sie van twee neutronensterren geregistreerd (GW170817). Dit betrof een signaal van meer dan een minuut. 1,7 seconden na die samensmelting volgde een gammaflits die door twee ruim- tetelescopen (FERMI en IN-TEGRAL) werd waargenomen [3]. De door het GW-netwerk verstrekte informatie heeft de oorspronkelijke lokalisatie van FERMI aanzienlijk verbeterd

(figuur 2). Hierdoor konden in de daarop volgende uren en dagen zo'n zeventig optische telescopen, zowel in de ruimte als op aarde, de gebeur- tenis ook observeren; ieder in zijn eigen golflengtegebied, variërend van röntgenstraling tot radiogolven. Daarbij is voor de tweede keer ooit een kilonova waargenomen, een ver- schijnsel voorspeld door theoretische

Alessandro Berto- lini promoveerde aan de Universiteit van Pisa op inertiële sensoren voor de trillingsisolatie van Advanced LIGO. Als postdoc werkte hij bij de cryogene ver- sneller van XFEL, de nieuwe röntgenbron van DESY in Hamburg en daarna aan de 10-meter onderzoeksinterferometer van het Albert Einstein Instituut in Hannover. Nu is hij Nikhef-staffid in de gravitatie- golvgroep opgericht door Jo van den Brand.



A.Bertolini@nikhef.nl

Eric Hennes was jarenlang practi- cumdocent na- tuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam voordat hij overstapte naar de wetenschappe- lijke instrumentatie bij het Technologiecentrum van dezelf- de universiteit. Sinds 2007 is hij op het Nikhef onder andere betrokken bij de ontwikkeling van seismische sensoren en systemen voor trillingsdemping ten behoeve van de huidige en toekomstige gravitatiegolfdetectoren.



E.Hennes@nikhef.nl

astrofysici, maar nooit eerder zo duidelijk als zodanig herkend. Een kilonova is een kortstondige uitbarsting van elektromagnetische straling die karakteristiek is voor de synthese van kernen van zware elementen. Nu weten we eindelijk zeker hoe en waar atomen zwaarder dan ijzer kunnen ontstaan. LIGO en Virgo zijn inmiddels beide overgeschakeld naar de *commissioning*-status, waarin hun gevoeligheid verder wordt verbeterd met het oog op de volgende gemeenschappelijke observatieperiode die eind 2018 begint.

## De detectoren

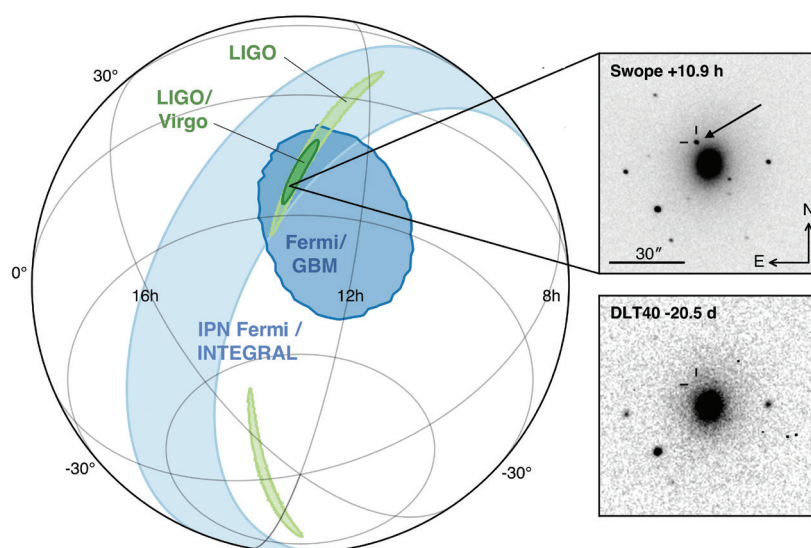
Gravitatiegolven ontstaan bij heftige gebeurtenissen in het heelal waarbij grote massa's zeer sterk versneld worden en zijn in 1916 door Einstein beschreven als uitvloeisel van zijn algemene relativiteitstheorie. Het zijn trillingen van de ruimtetijd die zich voortplanten met de snelheid van het licht [5]. Gravitatiegolven zijn transversale golven die de ruimte plaatse-lijk in één richting uitrekken, terwijl gelijktijdig in de richting loodrecht daarop de ruimte evenzoveel krimpt (of andersom). Dat kan waargenomen worden door de afstand tussen vrije testmassa's te meten en dat is precies waar een Michelsoninterferometer geschikt voor is (figuur 3a). De spiegels en bundelsplitser (*beam splitter*) dienen hierbij als testmassa's. Een gravitatiegolf die loodrecht op het vlak van de interferometer valt maakt de ene arm langer met bijvoorbeeld  $\Delta L_1$ , terwijl de andere arm juist korter wordt ( $\Delta L_2$ ) en vice versa. De mate van 'ruimterek' van de golf op ieder moment (Engels: *gravitational strain*) is gedefinieerd als  $h(t) = (\Delta L_1 - \Delta L_2) / L$ , met  $L$  de lengte van de interferometerarmen. Als gevolg hiervan onder- vinden de twee gereflecteerde licht- stralen die bij de bundelsplitser weer bij elkaar komen een onderlinge fase- verschuiving  $\phi(h) = 4\pi Lh/\lambda$ , waarbij  $\lambda$  de lasergolflengte is;  $\lambda = 1064$  nm bij zowel LIGO als Virgo. Deze fase- verschuiving wordt gemeten als een verandering in de intensiteit van het licht op de fotosensor volgens:

$$P_{out} = \frac{P_L}{2} \left[ 1 + \cos \left( \varphi_0 + \frac{4\pi L}{\lambda} h \right) \right] \quad (1)$$

waarbij  $P_L$  het laservermogen is. In de praktijk wordt de interferometer zeer dicht bij de *dark fringe*-toestand afge-



**Figuur 1** Luchtfoto van Virgo, de gravitatiegolfdetector met zijn drie kilometer lange armen.



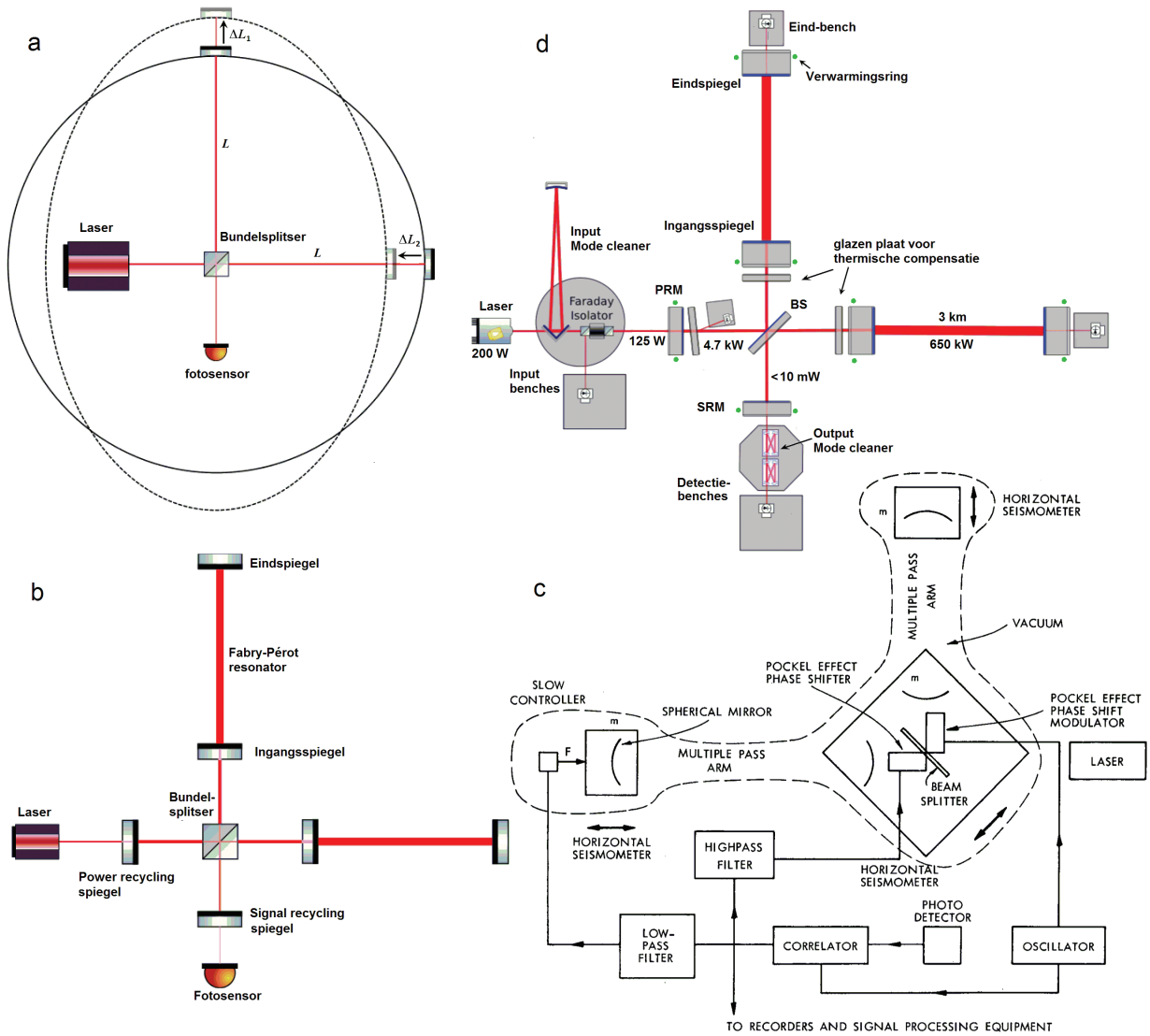
**Figuur 2** Links: Hemelkaart met lokalisatieschattingen van GW170817 op basis van detectie van gammastraling door de INTEGRAL- en FERMI-satellieten (in blauw) en, op- merkelijk nauwkeurig, door het LIGO-Virgo netwerk (in groen). Rechtsboven staat de locatie van de nieuwe optische bron aangegeven, ontdekt door de Swope-tele- scope in Chili, elf uur na de samensmelting van de neutronensterren. Rechtsonder hetzelfde gebied, enige weken ervoor gemeten door de DLT40-survey met een van de PROMPT-telescopen, ook in Chili. Hierin is deze bron nog niet zichtbaar [2]. De grote zwarte vlek is het centrum van het sterrenstelsel NGC 4993 waarin de samensmelting plaatsvond.

steld, waarin beide bundels elkaar vrijwel uitdoven ( $\phi_0 \approx (2n+1)\pi$ , met  $n$  een geheel getal) om het effect van schommelingen in het laservermogen zo veel mogelijk te onderdrukken.

## Opvoeren van de signaalsterkte

De amplitude van gravitatiegolven neemt omgekeerd evenredig af met de afgelegde afstand tot de bron. De verwachte grootte van de te meten ruimterek  $h$  is dan ook zeer klein, in de orde van grootte van  $10^{-22}$  m/m. Om

de respons van de detector te vergroten worden de interferometerarmen vervangen door Fabry-Pérot-resona- toren. Hierin kaatsen de lichtbundels vele malen heen en weer voordat ze weer bij de bundelsplitser samenko- men (figuur 3b). Het idee om gebruik te maken van de lange tijdsschaal van het te observeren signaal (millisecon- den) in vergelijking met de tijd waarin het licht éénmaal heen en weer door de armen gaat ( $\sim 20 \mu s$ ), werd door Nobellaureaat Rainer Weiss [6] al in 1972 voorzien (zie figuur 3c). Bij



**Figuur 3** a) Effect van een gravitatiegolf die loodrecht op een Michelsoninterferometer valt. Deze vervormt de ruimte zodanig dat de ene arm korter wordt en de andere evenveel langer, waardoor de intensiteit van het licht op de fotosensor wordt gemoduleerd. De sterkste respons wordt verkregen voor golven waarvan de polarisatie-richting met een van de armen samenvalt. b) Vereenvoudigde optische configuratie van LIGO en Virgo. Iedere arm van de interferometer bestaat uit een vier kilometer (LIGO) of drie kilometer (Virgo) lange Fabry-Pérot optische resonator, gevormd door een ingangsspiegel en een eindspiegel. Dit vergroot de armlengte effectief een factor 280. Dankzij de power recycling- (PRM) en signal recycling- (SRM) spiegels wordt de signaal-ruisverhouding van het fotosensorsignaal extra vergroot. c) De gravitatiegolfdetector zoals voorzien door Nobellaureaat 2017 Rainer Weiss in zijn historische document uit 1972 [4], met elementen die de huidige detectoren ook bevatten, waaronder multiple pass-lichtarmen, actieve trillingsdemping en modulatie-technieken die nodig zijn voor de uitlijning. d) Een gedetailleerder optisch schema van Advanced Virgo. Behalve de laser zijn alle onderdelen in vacuüm geplaatst en voorzien van trillingsisolatie. Voordat het laserlicht in de interferometer wordt geïnjecteerd wordt het geleid door een 144 meter lange driehoekige resonator: de input mode cleaner (IMC). Hiermee wordt de jitterruis onderdrukt en worden alle andere lasermodes dan de Gaussische TEM<sub>00</sub> weggefilterd. De Faraday-isolator is een optische éénrichtings-sluis: licht dat terugkeert vanaf de PRM kan dankzij dit onderdeel niet terug richting IMC en laser. Op diverse plaatsen (bij de benches) wordt een beetje licht afgetapt om de positie en oriëntatie van de spiegels te controleren tot op respectievelijk een nanometer en een nanoradiaal (zie ook figuur 5).

Virgo hebben de ingangsspiegels een transmissiecoëfficiënt  $T_s = 1,4\%$ , waardoor de lengte van de arm met een factor  $4/T_s = 280$  tot  $L_{eff} = 840$  km wordt vergroot. De faseverschuiving per eenheid van (ruimte)rek  $h$  wordt gegeven door:

$$\frac{d\varphi}{dh} = \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{L_{eff}/L}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}},$$

$$f_c = c/2\pi L_{eff} \quad (2)$$

Vergelijking 2 is geldig voor  $\lambda_{GW} \gg 2L$ , ofwel  $f \ll 100$  kHz en laat zien dat de versterkingsfactor ( $L_{eff}/L = 280$  voor lage frequenties) geleidelijk afneemt boven een kantelfrequentie  $f_c = 57$  Hz, tot een factor 1,6 rond 10 kHz.

Vergelijking 1 toont daarnaast dat verhoging van het lichtvermogen op de bundelsplitter het fotosensorsignaal ook versterkt. Dat is mogelijk met de zogenoemde power recycling-techniek. Bij een Michelsoninterferometer in

de dark fringe-toestand wordt alle lichtenergie terug naar de laser gestuurd. Als we nu een extra spiegel, de Power Recycling Mirror (PRM) genoemd, tussen de laser en de bundelsplitter plaatsen (figuur 3d), wordt het grootste deel van dat licht weer teruggekaatst naar de bundelsplitter. De positie van de PRM-spiegel kiest men zodanig dat het teruggekaatste licht constructief interfereert met het 'verse' licht van de laser, zodat een optische resonantie ontstaat: de pow-



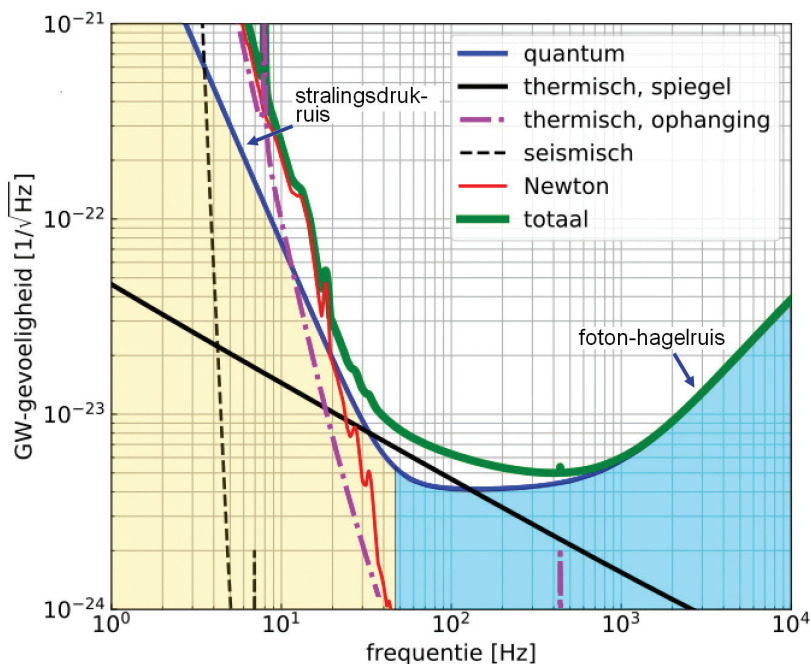
er recycling resonator. In Virgo neemt hierdoor het vermogen van het licht dat op de bundelsplitster valt toe met een factor 37,5.

Een andere techniek, *signal recycling*, kan worden aangewend om de respons van de interferometer op gravitatiegolven nog verder te verhogen. Hiertoe wordt nog een spiegel, de *Signal Recycling Mirror* (SRM), geplaatst tussen de bundelsplitster en de fotosensor. Dit vormt net als bij *power recycling* een optische resonator in combinatie met de rest van het systeem, waardoor het signaal extra versterkt wordt boven de voornoemde kantelfrequentie.

## Ruisbronnen en hun onderdrukking

De quantumaard van licht stelt een uiterste limiet aan de resolutie van de detectoren. Het aantal fotonen per tijdseenheid dat de fotosensor bereikt volgt een Poissonverdeling met gemiddelde waarde  $P_{out}/(\hbar\omega)$  en standaardonzekerheid  $\sqrt{P_{out}/\hbar\omega}$ . Hier is  $\omega$  de hoekfrequentie van de fotonen en  $\hbar$  de gereduceerde constant van Planck. Dit resulteert in een witte signaalruis, foton-hagelruis of *shot noise* genoemd, waarvan de relatieve sterkte omgekeerd evenredig is met de wortel uit het vermogen dat op de bundelsplitster valt.

Een tweede type quantumgerelateerde ruis ontstaat door de meervoudige reflecties van fotonen in de Fabry-Pérot-resonatoren. Elk foton heeft impuls  $2\pi\hbar/\lambda$ , dus bij elke reflectie draagt het een impuls  $4\pi\hbar/\lambda$  over op de spiegel. De bundel oefent dus een zekere druk uit op de spiegel: de stralingsdruk (*radiation pressure*). Door de willekeurige tijdstippen van de reflecties vertoont deze druk een fluctuatie, wederom met een wit spectrum en een RMS-amplitude evenredig aan de wortel van het optische vermogen dat in de armen circuleert. De spiegels zijn opgehangen aan een keten van slingers om zo goed mogelijk aan de 'vrije-val'-conditie te voldoen. Boven de slingerfrequentie geven deze drukfluctuaties de spiegel een witte versnellingsruis mee. Hieruit volgt dat de positie van de spiegel en het daarmee corresponderende meetsignaal ( $h$ ) een ruisspectrum vertoont met een amplitude evenredig aan  $1/f^2$  (figuur 4). Het is duidelijk dat deze stralingsdrukruis (*radiation pressure noise*)



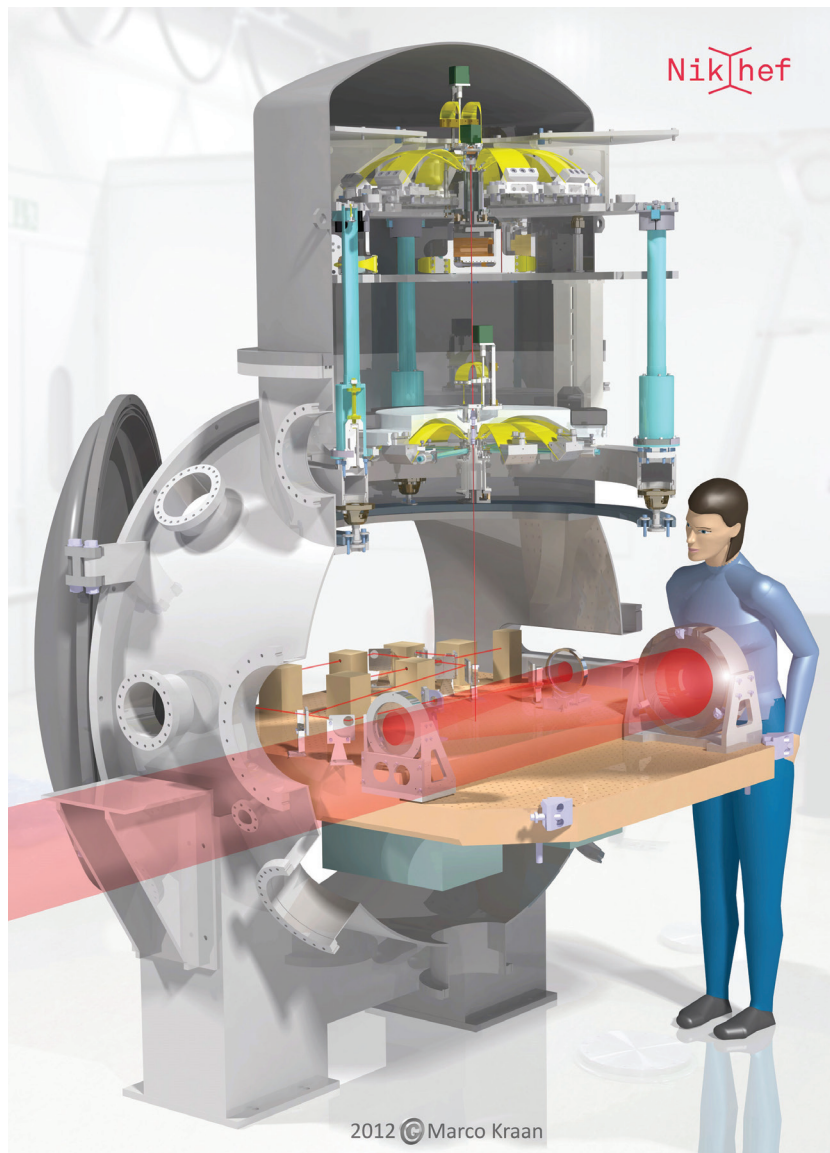
**Figuur 4** Verwacht ruisbudget van Advanced Virgo, weergegeven als de wortel uit de spectrale vermogensdichtheid (Engels: ASD, *amplitude spectral density*) van de diverse bijdragen aan de ruis in het meetsignaal. De eenheid ( $1/\sqrt{\text{Hz}}$ ) geeft aan dat het hier gaat om de RMS-waarde bij een bandbreedte van 1 Hz. Een signaal met frequentie  $f$  en amplitude  $h$  is meetbaar als geldt:  $h \gg \text{ASD}(f)\sqrt{T}$ , waarbij  $T$  de tijdsduur van het signaal is. In licht-geel en -blauw zijn de frequentiegebieden aangegeven waar de quantumruis gedomineerd wordt door respectievelijk stralingsdrukruis en foton-hagelruis. Tussen 30 en 150 Hz is thermische ruis vanwege dissipatie in de spiegelcoatings overheersend. Bij lagere frequenties zijn de thermische ruis in de ophangingsdraden en de Newtonian noise limiterende factoren. Dankzij de trillingsisolatie is de seismische ruis verwaarloosbaar boven  $\sim 4$  Hz.

de gevoeligheid van de detector bij lage frequenties kan beperken. Merk op dat bij groter optisch vermogen de signaal-ruisverhouding toeneemt voor hagelruis, maar vermindert voor stralingsdrukruis.

Quantumruis limiteert de gevoeligheid van de huidige detectoren boven ongeveer 150 Hz. (figuur 4). Beneden deze frequentie worden de huidige ruiscursen vooral bepaald door materiaalbeperkingen en omgevingsoorzaken. Thermische fluctuaties in de spiegelcoating en in de draden waaraan de spiegels hangen roepen interne dissipatieprocessen op, die op hun beurt een Brownse beweging van de spiegels genereren. Gevolg: een thermische bijdrage aan de signaalruis. Microseismische trillingen boven 10 Hz vertonen amplitudes van orde grootte 1 nm. Niet veel misschien, maar ze zijn altijd nog zo'n tien ordes van grootte te sterk om de verwachte spiegelverplaatsingen als gevolg van een zwaartekrachtgolf ( $10^{-19}$  m) te kunnen meten. Gelukkig kunnen seismische trillingen in alle vrijheidsgraden succesvol onderdrukt worden door de spiegels op te hangen aan trillingsisolatoren bestaande uit

complexe meertraps mechanische filters [7].

Echter, zelfs als de huidige generatie detectoren hun ontwerpresolutie hebben bereikt, zullen grondtrillingen nog steeds op een subtiele wijze tot de spiegels doordringen: seismische golven die een spiegel passeren zorgen ervoor dat de plaatselijke gravitatieversnelling ( $g$ ) schommelt, zowel in grootte als in richting. De bijbehorende fluctuerende zwaartekracht werkt rechtstreeks op de spiegel en omzeilt dus het trillingsisolatiesysteem. Deze storing wordt *Newtonian noise* (NN) genoemd en kan alleen worden getemperd door arrays van seismometers rond de spiegels van de detector te plaatsen waarmee het seismische profiel van de omgeving in kaart gebracht wordt. Op basis hiervan kunnen de NN-krachten op de spiegel geschat worden en daarmee hun effect op het meetsignaal. Vervolgens kan deze bijdrage van het meetsignaal worden afgetrokken met behulp van geschikte algoritmen [8]. De GW-groep van het Nikhef in Amsterdam leidt de inspanningen om dit systeem te ontwikkelen voor de volgende upgrade van Virgo [9].



**Figuur 5** Artistieke impressie van een van de vijf optische tafels (*benches*) uit figuur 3d. Een klein beetje licht wordt van de interferometer afgetapt (de rode bundel). De brede bundel wordt versmald met behulp van een telescoop en gemeten met een kwadrantfotodiode. De optiek is opgesteld op een 320 kg zware tafel (oranje) die in vacuüm is opgehangen aan een stalen draad van 2 mm dik (rood). Deze draad is op zijn beurt verbonden met een trillingsisolator, MultiSAS genoemd (*Multistage Seismic Attenuation System*), ontwikkeld en gebouwd door het Nikhef. De belangrijkste elementen daarvan zijn de drie *Inverted Pendulum Legs* (in blauw) en de twee verticale *Geometric Antispring-filters* (met bladveren in geel).

### Op weg naar de ontwerpgevoeligheid

Het resultaat van de eerste gezamenlijke LIGO-Virgo-observatierun overtrof de verwachtingen, als je bedenkt dat de eerste stappen richting hun uiteindelijke ontwerpgevoeligheid, Advanced Virgo [10] en Advanced LIGO genaamd, nog maar net zijn gemaakt. Dat betreft voor Virgo onder andere seismische isolatie van alle optische systemen voor de bundelinjectie en de uitlijning en het uitlezen van de detector (figuur 5). Deze zijn ontworpen en gebouwd op het Nikhef [11]. De komende jaren wisselen Virgo en LIGO observatieperiodes af met

upgrade-activiteiten. Zo zal het geïnjecteerde laservermogen geleidelijk worden verhoogd van 13 naar 125 W, waarmee de hagelruis met een factor drie wordt verminderd. Dat is geen sinecure, omdat het bundelvermogen in de *power recycling* en Fabry-Pérot-resonatoren daarmee oploopt tot respectievelijk 5 en 640 kW. Een heel klein deel hiervan wordt door de spiegels geabsorbeerd, die daardoor plaatselijk opwarmen en dus vervormen. Dat geeft aberraties die naar verwachting tot sterke verstoringen leiden. Om die vervormingen te compenseren is een complex thermisch compensatiesysteem (TCS) opgetuigd, waarmee

de spiegels plaatselijk, vooral aan de rand, extra verwarmd worden, zodat hun vorm herstelt [12]. Dat gebeurt met verwarmingselementen rond de spiegels en met glazen platen vlak voor de ingangsspiegels die op iedere gewenste locatie bestraald kunnen worden met infrarood licht van een CO<sub>2</sub>-laser (figuur 3d). Deze thermische actuatoren worden aangestuurd op basis van informatie van diverse types golffrontsensoren, waaronder een op het Nikhef ontwikkelde fase-camera waarmee afwijkingen van een golffrontprofiel met nanometerprecisie worden bepaald [13].

### Verdere vooruitblik

In de komende jaren zal het wereldwijde netwerk van interferometers worden uitgebreid met de Japanse detector KAGRA en een LIGO-detector in India. Verder zal de gevoeligheid van LIGO en Virgo verder verbeterd worden om de bestaande faciliteiten optimaal te benutten. Zo zijn intensieve R&D-campagnes gestart ter verbetering van spiegelcoatings en op het gebied van *squeezed light injection*, een geavanceerde truc om de fase- of amplitudecomponenten in de quantumruis, die voldoen aan Heisenbergs onzekerheidsrelatie, selectief te verlagen als functie van de frequentie. De resultaten zullen mede de weg bereiden voor de derde generatie detectoren zoals de ondergrondse Einstein-telescoop in Europa en de Amerikaanse Cosmic Explorer met armen van veertig kilometer, waarmee de inflatie van het heelal kort na de oerknal in bereik komt.

### Referenties

- 1 C. Van Den Broeck, *NTvN* 83-01 (2017).
- 2 J. Van Den Brand, *NTvN* 83-05 (2017).
- 3 B.P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 141101 (2017).
- 4 B.P. Abbott et al., *ApJL* **848**, L12 (2017).
- 5 A. Einstein, *Ann. Der Phys.*, **49**, 769 (1916).
- 6 R. Weiss, *MIT Quarterly Progress Report*. **N.105** (1972).
- 7 S. Braccini et al., *Astroparticle Physics*, vol. **23**, 557-565 (2005).
- 8 M.G. Beker et al., *Gen. Relativ. Grav.* **43**, 623-656 (2011).
- 9 S. Koley et al., *First Break* **35**, 71-78 (2017).
- 10 F. Acernese et al., *Class. Quantum Grav.* **31**, 024001 (2014).
- 11 M.G. Beker et al., *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 034501 (2014).
- 12 A. Rocchi et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **363**, 012016 (2012).
- 13 L. van der Schaaf et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **718**, 072008 (2016).