**LISA voor lange golflengtes**

**.**

**Om zwaartekrachtgolven met langere golflengtes te kunnen meten, moet over tien jaar LISA gelanceerd worden. Wat draagt Nederland bij aan deze ambitieuze Europese missie? En wat voor wetenschappelijke waarnemingen brengt deze constellatie van drie satellieten binnen bereik?**

Auteur: Gijs Nelemans / Auteurs: Gijs Nelemans, Niels van Bakel en Jean in ‘t Zand

De Laser Interferometer Space Antenna (LISA) is een ruimtemissie van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA met als doel zwaartekrachtgolven te detecteren met veel langere golflengtes dan de detectoren op aarde kunnen. De missie staat gepland voor lancering in 2035, precies twintig jaar na de eerste meting van de LIGO/Virgo-samenwerking.

De ruimte heeft twee duidelijke voordelen: minder ruis en meer plek om heel grote detectoren te maken. De meting van zwaartekrachtgolven komt namelijk effectief neer op het meten van een relatieve verandering van de afstand L tussen twee plekken in de ruimtetijd. oftewel: L/L. Hoe groter L, hoe groter L, dus hoe makkelijker te meten. De ruimte heeft ook een groot nadeel: het is duur om er een detector naartoe te brengen en eenmaal gelanceerd kun je er niet meer aan sleutelen.

Waarom zou je die nadelen op de koop toenemen? Voor zwaartekrachtgolven geldt hetzelfde als voor elektromagnetische straling: verschillende fenomenen produceren straling met verschillende golflengtes. Voor zwaartekrachtgolven is er een handige vuistregel: de golflengtes zijn ongeveer even groot als de objecten die ze produceren en ook de detectoren moeten ongeveer net zo groot zijn als de golflengte. Detectoren op aarde zoals LIGO, Virgo en de Einsteintelescoop zijn michelson-interferometers met armlengtes van enkele kilometers. Door het laserlicht vaak heen en weer te sturen, worden effectieve armlengtes van honderden kilometers bereikt. Maar het aantal objecten in het heelal met zulke afmetingen is beperkt tot neutronensterren en zwarte gaten van hooguit zo’n honderd keer de massa van de zon. De meeste objecten in het heelal zijn veel groter. Om zwaartekrachtgolven van die objecten te kunnen meten is dus een veel grotere detector nodig – zoals LISA.

**Technische uitdagingen**

De LISA-missie zal bestaan uit drie satellieten van elk een paar meter doorsnede op een onderlinge afstand van 2,5 miljoen kilometer die laserlicht uitwisselen. Elke satelliet heeft twee lasers om signalen naar de andere satellieten te sturen en twee telescopen om het licht van de andere satellieten op te vangen. Door het ontvangen laserlicht via interferometrie te vergelijken met een referentielaser kan het effect van een passerende zwaartekrachtgolf op de onderlinge afstand tussen de satellieten gemeten worden.

Dat klinkt simpeler dan het is! De uitdaging is om de afstanden van 2,5 miljoen kilometer (2,5 109 meter) te meten tot op een picometer (10-12 meter) nauwkeurig. Daarbij verandert de afstand tussen de satellieten gedurende een jaar met tienduizenden kilometers. Bovendien varieert de onderlinge hoek, dus moet het laserlicht gericht worden. Daarnaast moet alles uitermate precies en stabiel zijn, de lancering overleven, niet te zwaar zijn en tien jaar zonder ingrijpen kunnen functioneren.

Hoe ziet zo’n geavanceerde opstelling eruit? Het licht van de 2 watt-laser wordt via een aantal uiterst precieze elementen op een optische bank naar een klein spiegeltje gestuurd dat het licht precies in die richting weerkaatst waar de andere satelliet zich 8,33 seconden later bevindt. Dat spiegeltje moet dus een beetje kunnen kantelen, zonder de afstand die het licht aflegt met meer dan een picometer te veranderen. Dat staaltje precisietechniek is door TNO ontwikkeld.

Bij de andere satelliet vangt een uiterst stabiele telescoop van 30 centimeter doorsnede het licht op. De laserbundel is aan het begin uiterst nauw, maar waaiert over die 2,5 miljoen kilometer toch uit tot een diameter van kilometers. Het telescoopje kan dus maar een minieme fractie van het licht opvangen. Toch is die circa 20 nanowatt ruim voldoende voor de meting. Het licht wordt door de telescoop geconcentreerd en gemengd met een lokale laser. Het dynamische interferentiepatroon hiervan – waaruit het effect van een passerende zwaartekrachtgolf afgeleid kan worden – wordt door uitermate gevoelige fotodiodes gemeten. De LISA Pathfinder-missie toonde in 2016 aan dat de noodzakelijke precisie van dit zogenaamde Interferometric Detection System (IDS) haalbaar is in de ruimte.

Voor de LISA-missie volstaan commercieel beschikbare diodes niet. Daarom is er speciale fotodiode ontwikkeld, gebaseerd op InGaAs-halfgeleidertechnologie, met een relatief dikke depletielaag van 17 micrometer. Dankzij dit ontwerp blijft de elektronische ruis laag genoeg om de vereiste gevoeligheid te halen. Verder is het een zogenoemde *quadrant photodiode* (QPD) die bestaat uit vier afzonderlijk uitgelezen segmenten om kleine afwijkingen in de uitlijning van de laserbundels te kunnen detecteren. Deze geavanceerde QPD’s worden sinds 2019 ontwikkeld door een Nederlands consortium bestaande uit Nikhef, SRON en het hightechbedrijf Bright Photonics. De QPD’s worden op de optische tafel geïntegreerd met ultra-lage-ruis-uitleeselektronica en ondergebracht in een geavanceerde behuizing. Dit geheel vormt de *quadrant photoreceiver* (QPR).

De technologische uitdagingen zijn talrijk en interdisciplinair. De elektronica moet weinig warmte produceren, bestand zijn tegen straling in de ruimte en minimale elektromagnetische interferentie veroorzaken. De behuizing moet compact en mechanisch stabiel zijn, afschermen tegen externe elektromagnetische signalen, instelbaar zijn op de optische tafel en bestand zijn tegen thermische variaties zonder dat de uitlijning verloren gaat.

De eerste QPRs worden in 2026 geleverd voor het Engineering Model van de LISA Optical Bench Assembly. Dit is een belangrijke mijlpaal waarbij de functionele prestaties van het IDS voor het eerst op systeemniveau worden gevalideerd. Dat betekent dat deze technologieën, ondanks hun complexiteit, binnen enkele jaren moeten uitgroeien tot ruimtewaardige componenten die de ruggengraat vormen van een van de meest ambitieuze ruimteobservatoria van de komende decennia.

Om de binnenkomende laserstralen zo goed mogelijk op de fotodiodes te laten vallen, is een *beam-alignment*-mechanisme bedacht, dat zonder de hoek van de straal aan te passen de bundel kan ‘verschuiven’. Daarnaast is een mechanisme dat de fiber waar het laserlicht doorheen geleid wordt kan verwisselen voor de fiber waar het licht van de back-uplaser uit zal komen, mocht de originele laser problemen geven.

Omdat de satellieten zelf door allerlei effecten verstoord worden, kan de interferometrie niet zomaar op de optische bank plaatsvinden. Binnen in de satellieten zit een speciaal instrument, het Gravitational Reference System (GRS). Dat bestaat uit een goud-platina blokje van enkele centimeters, de testmassa, die zich in een speciale kooi bevindt. Na de lancering wordt het voorzichtig losgelaten, waarna het vrij en onverstoord door de ruimtetijd zweeft. De effecten van een passerende zwaartekrachtgolf moeten het enige zijn wat de baan van dit blokje beïnvloedt. . Als het blokje richting de rand van de kooi beweegt, verandert de elektrische capaciteit tussen blokje en wand. Die verandering wordt gemeten en omgezet in een kleine manoeuvre van de satelliet met stuwraketjes zodat de satelliet de baan van de testmassa volgt zonder die aan te raken. Met LPF is aangetoond dat de overblijvende kracht op de testmassa die de baan kan verstoren kleiner is dan een paar femtometer/s2 (10-15 m/s2).

**Nieuwe wetenschap**

Wetenschappelijk heeft LISA veel nieuws te brengen: er zijn vier heel verschillende typen bronnen van zwaartekrachtgolven die zeker gedetecteerd worden. Daarnaast houdt ESA expliciet rekening met de mogelijkheid dat LISA onverwachte bronnen gaat meten.

Zwaartekrachtgolven worden geproduceerd door asymmetrische massa-verdelingen die versneld bewegen. Een systeem waarin twee compacte objecten om elkaar heen bewegen – en uiteindelijk samensmelten – is zo’n beetje de ultieme zwaartekrachtgolfbron. De LIGO/Virgo-metingen zijn tot nu toe bijvoorbeeld allemaal van de laatste (tientallen) seconden voor het samensmelten van paren neutronensterren of zwarte gaten met onderlinge afstanden van honderden kilometers. De eerste categorie bronnen die LISA kan waarnemen bestaat uit compacte objecten die in banen van miljoenen kilometers (en omlooptijden van tientallen minuten) om elkaar heen bewegen. Dat zullen voor een groot deel dubbele witte dwergsterreen in onze Melkweg zijn.

We denken dat er enkele tientallen miljoenen witte dwergen zijn in de Melkweg die voor LISA meetbare zwaartekrachtgolven uitzenden. Alleen zijn de meeste signalen te zwak om individueel te meten; dat is ‘slechts’ voor enkele (tien)duizenden mogelijk. De rest vormt een gezamenlijk geroezemoes dat collectief gemeten kan worden.

Deze metingen zijn te gebruiken om de verdeling van sterren in de Melkweg te bestuderen. Zowel de individuele als de gezamenlijke meting geven bovendien een hele nieuwe kijk op het eindstadium van de evolutie van deze modale dubbelsterren. Ook de dubbele witte dwergen komen steeds dichter bij elkaar en botsen op elkaar. Maar de golflengtes die ze daarbij uitzenden zijn te lang voor aardse detectoren. Maar als de witte dwergen botsen, kan er wel mooi kosmisch vuurwerk ontstaan: thermonucleaire ontploffingen, veroorzaakt door de fusie van koolstof. Dit is een van de beste verklaringen van de waargenomen supernova’s van het type Ia. Alhoewel we niet denken dat de LISA-metingen de uiteindelijke botsing zullen meemaken (dat gebeurt maar eens in de paar eeuwen in de Melkweg), leren de metingen ons wel iets over systemen die richting zo’n botsing bewegen. Naast dubbele witte dwergen verwachten we ook enkele tientallen dubbelsterren bestaande uit combinaties van witte dwergen, neutronensterren en zwarte gaten in de Melkweg.

**LISA en de Einsteintelescoop**

De tweede categorie bronnen voor LISA bestaat uit samensmeltende zwarte gaten van ongeveer een miljoen zonsmassa, die in het centrum van sterrenstelsels huizen. We weten dat melkwegstelsels vrij vaak botsen; waarbij waarschijnlijk dubbelsystemen van zulke zwarte gaten ontstaan die naar elkaar spiraliseren en samensmelten. De laatste, voor LISA meetbare fase daarvan duurt dagen tot maanden. De sterkte van deze zwaartekrachtgolven is enorm en de LISA-missie kan zulke samensmeltingen feitelijk door het hele waarneembare heelal detecteren. De toekomstige Einsteintelescoop (ET) zal samensmeltende lichtere zwarte gaten ook vrijwel door het hele waarneembare heelal kunnen detecteren. Samen zullen LISA en ET dus op spectaculaire manier in één klap het hele waarneembare heelal ontsluiten voor samensmeltende zwarte gaten.

De LISA-metingen van zware zwarte gaten geven niet alleen een goede kijk op het tot nu toe onbegrepen ontstaan van deze zwarte gaten; ook geven ze een meting van de ontwikkeling van de massa’s van deze systemen, door objecten van verschillende leeftijden met elkaar te vergelijken. Een heel andere toepassing van de enorm precieze LISA-metingen behelst het bestuderen van zwaartekracht zelf, waardoor de algemene relativiteitstheorie in ongeëvenaard detail getest kan worden en wellicht de eerste tekenen van quantumzwaartekracht aan het licht komen. En de samensmeltingen kunnen gebruikt worden om de uitdijing van het heelal te meten op een manier die onafhankelijk is van de metingen met licht (zoals met de ESA Euclid-telescoop) en die aanvult.

De derde categorie bronnen is in feite een combinatie van de eerste twee: lichte compacte objecten die rond zware zwarte gaten bewegen en langzaam naar binnen spiraliseren. Deze *extreme mass-ratio inspirals* (EMRI’s) zijn theoretisch voorspeld en zouden bij uitstek golflengtes hebben in het LISA-bereik. Ze zouden een schat aan informatie vormen over zowel de zware zwarte gaten in de centra van melkwegstelsels als de compacte objecten in de directe omgeving. Verder zijn ook EMRI’s uitmuntende laboratoria om de algemene relativiteitstheorie te testen en de eigenschappen van zwarte gaten in detail te meten. De kleine compacte objecten fungeren namelijk als testdeeltjes die de ruimtetijd van het zware zwarte gat in kaart brengen door er in steeds kleiner wordende banen omheen te draaien.

Tenslotte is er nog een spectaculaire, zij het wat speculatieve, categorie van bronnen, namelijk signalen van zwaartekrachtgolven uit het vroege heelal.Er zijn diverse modellen waarin bijvoorbeeld het begin of einde van de fase van inflatie in het heelal een zwaartekrachtgolfsignaal zou kunnen voorbrengen; LISA zou die signalen kunnen oppikken.

LISA is dus een technologisch hoogstandje met heel brede en rijke wetenschappelijke doelen, die een grote bijdrage kunnen leveren aan het oplossen van fundamentele vragen in de sterrenkunde en natuurkunde. Maar voor de geplande lancering in 2035 zijn er nog een flink aantal hordes te nemen om zowel de technologie als de internationale samenwerkingen tot een goed einde te brengen!

**Gijs Nelemans** is hoogleraar zwaartekrachtgolvenastrofysica aan de Radboud Universiteit Nijmegen en een van de leiders van het LISA NL-consortium.