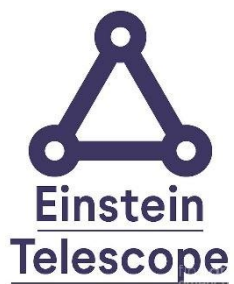


## DOMEIN 4 - OPTICA



Output Programmacommissie Fase 2

Domein 4: Optica

Uitdaging: Ontwikkeling en demonstratie van grote Si spiegels en coatings voor toepassing bij 10-20 K

*Versie 0.5 (19.10.23)*

## **Output Programmacommissie Fase 2: Domein 3 - Optica**

Voor de realisatie van Einstein Telescope zijn uiterst geavanceerde instrumenten en technologieën nodig die nu nog in ontwikkeling zijn. De valorisatieopgave binnen het Nationale Groeifondsproject richt zich in eerste instantie op een aantal specifieke technologieën of technologiedomeinen. Deze lijst is in Fase 1 vastgesteld door een Programmacommissie met wetenschappers die nauw betrokken zijn bij de ontwikkeling van de Einstein Telescope.

Fase 1 van de Programmacommissie is afgerond door middel van een algemene update van de technologiedomeinen, aangevuld met key challenges per technologiedomein. Vervolgens wordt in Fase 2 per technologiedomein nader geconcretiseerd en gedetailleerd wat de technologische uitdagingen c.q. deelproblemen zijn.

Deze output kan vervolgens worden gebruikt;

- Om het high tech bedrijfsleven in Nederland in kaart brengen en partijen uit te nodigen zich met het ET-ecosysteem te verbinden.
- Om verder in kaart te brengen welke marktkansen er zijn voor toepassing van de technologieën buiten de context van de Einstein Telescope;
- Als input voor de openstellingsteksten in de R&D-regeling technologiedomeinen Einstein Telescope. Voor dit domein is een openstelling voorzien in juni 2024 met een budget van maximaal € 2.500.000,00.

## Uitwerking technologiedomein Optica

### 1. Introductie

De toekomstige Einstein Telescope (ET) is een observatorium voor zwaartekrachtgolven dat afhankelijk is van de meting van minieme relatieve lengteverschillen tussen de kilometerslange armen van een laserinterferometer. Optische systemen zijn een cruciaal aspect van ET: de 200 kg zware, supergepolijste spiegels met hooggeoptimaliseerde coatings aan de uiteinden van de armen dienen als testmassa's; een ultrastabiele laser levert de monochromatische laserstralen die de testmassa's aftasten; talloze extra optische systemen en sensoren dienen om het instrument te controleren en te stabiliseren om de signatuur van de passage van een zwaartekrachtgolf door ET te kunnen detecteren als een minuscule 'flikkering' in de fotodetector (fotodiode) die de intensiteit van de gerecombineerde laserstralen registreert. Hieronder staat een nadere toelichting.

### 2. Uitdaging samengevat

Ontwikkeling en interferometrisch testen van grote (10-50 cm diameter) siliciumspiegels met een bulkabsorptie voor 1550nm laserlicht van minder dan een paar ppm/cm en supergepolijste oppervlakken met een vlakheid van minder dan  $\pm 2$ nm, een kwadratisch gemiddelde ruwheid van minder dan 100pm en gecoat met een ruisarme, hoge reflectiviteit ( $T=10$ ppm) coating.

### 3. Uitdaging van optica in meer detail

Een van de unieke eigenschappen van de Einstein Telescope is het gebruik van cryogeen gekoelde spiegels om de detectiesnelheid voor lage gravitatiegolf frequenties (onder 20 Hz) aanzienlijk te verbeteren door de thermische ruis in met name de spiegelcoatings en -suspensies te verminderen. Kristallijn silicium, een bekend materiaal uit de halfgeleiderindustrie, is ideaal voor dit doel: naast zijn uitstekende mechanische kwaliteitsfactor vertoont silicium een verwaarloosbare thermische uitzettingscoëfficiënt bij temperaturen rond 120 en onder 20 K en wat nog belangrijker is, het wordt een uitstekende thermische geleider bij lage temperatuur. Thermische spiegelvormingen zullen sterk verminderen in vergelijking met gesmolten-siliciumspiegels.

Wat betreft het kristallijne siliciumsubstraat of ingot moet de bulkabsorptie van het laserlicht dat de spiegels verwarmt onder ongeveer 5 ppm/cm worden gehouden om de spiegels, met name bij 20 K, op een stabiele cryogene temperatuur te kunnen houden. Aangezien resterende vrije ladingsdragers de absorptie domineren bij de beoogde golflengten van 1,5 - 2,0  $\mu$ m, zijn substraten met een hoge weerstand (beter dan 10 k $\Omega$  cm) vereist. Terwijl float-zone gegroeid silicium de vereiste hoge weerstand bereikt, is het technisch beperkt tot kleinere diameters. Groeiprocessen die grote substraten bereiken met weinig onzuiverheden, zoals magnetisch ondersteunde Czochralsky-processen, moeten verder worden onderzocht.

De polijstspecificaties van het silicium zullen vergelijkbaar zijn met de zeer hoge eisen die momenteel worden gesteld aan gesmolten siliciumdioxide voor de LIGO- en Virgo-observatoria: Deze spiegels (ongeveer 40 kg per stuk) worden gepolijst met een kromtestraal van ongeveer 2 km, met een vlakheid van  $\pm 2$  nm en een ruwheid van minder dan 0,1 nm. Deze precisie wordt bereikt met behulp van elektrolytisch polijsten, ionenbundelbeitsen en corrigerende (meerlaagse) coatings. De reflectiviteit van deze spiegels is 99,999% en de gemeten bulkabsorptie per centimeter is minder dan 1 ppm.

Polijstprocessen die dezelfde specificaties kunnen leveren op siliciumsubstraten moeten worden onderzocht en hun kwaliteit moet worden bewezen door middel van geschikte metrologie, inclusief parameters zoals doorgelaten golffrontvervorming en absorptie. Met het oog op de verschillende golflengtes en de cryogene temperaturen moeten er geheel nieuwe meerlaagse coatings worden ontwikkeld. Dit is waarschijnlijk een van de meest uitdagende kwesties met betrekking tot de spiegels en een belangrijk onderzoeksgebied in de wereldwijde onderzoeksgemeenschap voor zwaartekrachtgolven.

#### **4. Specifieke doelstelling(en) binnen dit domein**

Ontwikkeling en interferometrisch testen van grote (10-50 cm diameter) siliciumspiegels met een bulkabsorptie voor 1550nm laserlicht van minder dan een paar ppm/cm en supergepolijste oppervlakken met een vlakheid van minder dan  $\pm 2\text{nm}$ , een kwadratisch gemiddelde ruwheid van minder dan 100pm en gecoat met een ruisarme, hoge reflectiviteit ( $T=10\text{ppm}$ ) coating.

#### **5. Context van het technologiedomein optica**

De toekomstige Einstein Telescope (ET) is een observatorium voor zwaartekrachtgolven dat steunt op de meting van minieme relatieve lengteverschillen tussen de kilometerslange armen van een laserinterferometer. Optische systemen zijn een cruciaal aspect van ET: de 200 kg zware, supergepolijste spiegels met hooggeoptimaliseerde coatings aan de uiteinden van de armen dienen als testmassa's; een ultrastabiele laser levert de monochromatische laserstralen die de testmassa's aftasten; talloze extra optische systemen en sensoren dienen om het instrument te controleren en te stabiliseren om de signatuur van de passage van een zwaartekrachtgolf door ET te kunnen detecteren als een minuscule 'flikkering' in de fotodetector (fotodiode) die de intensiteit van de gerecombineerde laserstralen registreert.

De verbazingwekkende precisie, 10-18 m relatieve spiegelverplaatsingen, die de LIGO- en Virgo-observatoria hebben laten zien in hun Nobelprijswinnende eerste detecties van zwaartekrachtgolven (2015-2019) zijn afhankelijk van een optimale combinatie en afstemming van 's werelds beste lasers en optische apparatuur. Om het laservermogen van enkele honderden kW in de armen (optische resonatoren) van de interferometer op te bouwen, moeten de retourverliezen minder dan 50 ppm zijn. Ook moeten golffrontvervormingen en verstrooiing van het lichtveld naar ruimtelijke modi van hogere orde tot een minimum worden beperkt en moet de laser extreem lage amplitude- en faseruis hebben, evenals een zeer stabiele richtnauwkeurigheid.

#### *Spiegels*

Zowel het LIGO- als het Virgo-observatorium gebruiken ultrazuiver gesmolten siliciumdioxide voor hun spiegels. Om de invloed van thermische ruis van het spiegeloppervlak, vooral van coatings, te beperken, worden grote laserstralen met een diameter van ongeveer 10 cm gebruikt. Dienovereenkomstig hebben de spiegels een diameter van ongeveer 50 cm nodig, zodat het diffractieverlies verwaarloosbaar is. Deze spiegels (ongeveer 40 kg per stuk) worden gepolijst met

een kromtestraal van ongeveer 2  $\mu\text{m}$ , met een vlakheid van  $\pm 2$  nm en een ruwheid van minder dan 0,1 nm. Deze precisie wordt bereikt met behulp van elektrolytisch polijsten, ionenbundelbeitsen en corrigerende (meerlaagse) coatings. De reflectiviteit van deze spiegels is 99,999% en de gemeten bulkabsorptie per centimeter is minder dan 1 ppm. Deze spiegels zijn opgehangen aan vier fused-silica vezels met een diameter van een paar honderd  $\mu\text{m}$ .

### *Lasers*

Alle huidige detectoren voor zwaartekrachtgolven werken op een continue golflengte van 1064 nm, waarbij gebruik wordt gemaakt van het zeer stabiele vaste-stof (NPRO) Nd:YAG ontwerp als zaadbron. De laser wordt verder versterkt tot ongeveer 100 W en ruimtelijk gefilterd om een zeer zuiver fundamenteel Gaussisch profiel te verkrijgen. Een hiërarchie van regelkringen met hoge bandbreedte en pre-stabilisatiestappen koppelen de laserfrequentie aan de kilometerslange resonatoren van de interferometer, waardoor uiteindelijk een frequentiestabiliteit van  $1\mu\text{Hz}/\text{Hz}\cdot 1/2$  wordt bereikt.

Algemene kenmerken waar deze systemen aan moeten voldoen en de uitdagingen daarbij:

- Een van de unieke eigenschappen van de Einstein Telescope is het gebruik van cryogeen gekoelde spiegels om de detectiesnelheid voor lage gravitatiegolf frequenties (onder 20 Hz) aanzienlijk te verbeteren door de thermische ruis in met name de spiegelcoatings en -suspensies te verminderen. Kristallijn silicium, een bekend materiaal uit de halfgeleiderindustrie, is ideaal voor dit doel: naast zijn uitstekende mechanische kwaliteitsfactor vertoont silicium een verwaarloosbare thermische uitzettingscoëfficiënt bij temperaturen rond 120 en onder 20 K en wat nog belangrijker is, het wordt een uitstekende thermische geleider bij lage temperatuur. Thermische spiegelvervormingen zullen sterk verminderen in vergelijking met spiegels van gesmolten siliciumdioxide.
- Om over te schakelen van gesmolten siliciumdioxide naar kristallijn silicium is een andere golflengte van het laserlicht nodig om het bulkspiegel materiaal transparant te maken. Dit kan worden bereikt bij golflengten van 1550 nm en hoger, waarbij ongeveer 2  $\mu\text{m}$  wordt bevoordeeld door overwegingen met betrekking tot optische coating. Er moeten nieuwe lasers worden ontwikkeld die voldoen aan de strenge eisen voor vermogensstabiliteit, richten, enzovoort, en veel nieuwe sensoren. In het bijzonder zullen ruisarme, zeer efficiënte sensoren met een groot oppervlak nodig zijn voor bundelbewaking en golffrontsensoren.
- Wat betreft het kristallijn siliciumsubstraat of ingot, moet de bulkabsorptie van het laserlicht dat de spiegels opwarmt onder ongeveer 5 ppm/cm worden gehouden om de spiegels, met name voor 20 K operaties, op een stabiele cryogene temperatuur te kunnen houden. Aangezien resterende vrije ladingsdragers de absorptie domineren bij de beoogde golflengten van 1,5 - 2,0  $\mu\text{m}$ , zijn substraten met een hoge weerstand (beter dan 10 k $\Omega$  cm) vereist. Terwijl float-zone gegroeid silicium de vereiste hoge weerstand bereikt, is het technisch beperkt tot kleinere diameters. Groeiprocessen die grote substraten bereiken met weinig onzuiverheden, zoals magnetisch ondersteunde Czochralsky-processen, moeten verder worden onderzocht.
- De polijstspecificaties van het silicium zullen vergelijkbaar zijn met de zeer veeleisende vereisten die werden bereikt met gesmolten siliciumdioxide voor de LIGO- en Virgo-observatoria. Polijstprocessen die dezelfde specificaties kunnen leveren op siliciumsubstraten moeten worden onderzocht en hun kwaliteit moet worden bewezen door middel van geschikte metrologie, inclusief parameters zoals doorgelaten golffrontvervorming

en absorptie. Met het oog op de verschillende golflengtes en de cryogene temperaturen moeten er geheel nieuwe meerlaagse coatings worden ontwikkeld. Dit is waarschijnlijk een van de meest uitdagende kwesties met betrekking tot de spiegels en een belangrijk onderzoeksgebied in de wereldwijde onderzoeksgemeenschap voor zwaartekrachtgolven.

- Finally, in the last stage of the vibration attenuators, the mirrors are envisaged to be suspended from few mm diameter crystalline silicon 'rods'. With crystalline silicon rods at cryogenic temperatures an excellent thermal conductivity will be achieved and using the same material for the rods and the mirrors minimizes mechanical loss. A major challenge will be to procure such rods with lengths of 1-2 meters and with excellent mechanical quality (scratch-free surfaces) to be able to carry the mirror load of 100-200 kg reliably, i.e., without the risk of ruptures.

## **6. Gerelateerde projecten**

In een aantal gerelateerde projecten is reeds vooronderzoek gedaan naar deze technologie:

- ET Technologies: In dit project is gerelateerd aan optica gewerkt aan...
- ETpathfinder: In dit project – tevens de R&D faciliteit voor de Einstein Telescope – kan de opstelling worden geïntegreerd en getest.