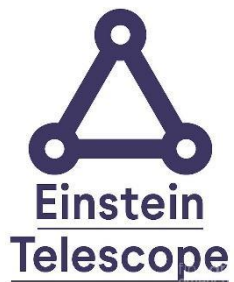


DOMEIN 3 - TRILLINGSDEMPING



Output Programmacommissie Fase 2

Domein 3: Trillingsdemping

Uitdaging: Ontwikkeling en demonstratie van geavanceerde trillingsisolatiesystemen voor de kern en hulpoptiek van de Einstein Telescope

Versie 1.0 (19.12.23)

Output Programmacommissie Fase 2: Domein 3 - Trillingsdemping

Voor de realisatie van de 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.

Technologiedomein	Ontwikkeling ten behoeve van ET
Domein 1 Trillingsvrij koelen	Ontwikkeling van trillingsvrij afkoelen van spiegels tot 10-20 K
Domein 2 Vacuümtechnologie	Kostenbesparingen van het vacuümsysteem en ontwerp van productiefaciliteit en installatiescenario
Domein 3 Trillingsdemping	Ontwikkeling van optimale combinatie van passieve en actieve trillingsdemping
Domein 4 Optica	Ontwikkeling van grote Si-spiegels en coating voor toepassing bij 10-20 K
Domein 5 Thermische deformaties	Ontwikkeling van technologie om thermisch geïnduceerde deformaties te monitoren en compenseren

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 verder in kaart te brengen en partijen uit te nodigen zich met het Einstein Telescope-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 van 8 april tot en met 31 mei 2024 met een budget van maximaal € 2.750.000,00.

Uitwerking technologiedomein Trillingsisolatie

1. Introductie

Om de waarnemingsgevoeligheid van de Einstein Telescope (ET) te kunnen bereiken, moet het grootste deel van het instrument gemaakt zijn van uiterst nauwkeurige componenten, drastisch geïsoleerd van alle storingsbronnen en in het bijzonder van seismische bewegingen. Alleen op die manier kan ruis dusdanig worden verminderd dat het mogelijk is zwaartekrachtgolven te meten. Binnen dit domein staat de ontwikkeling van geavanceerde trillingsisolatiesystemen voor de kern- en hulpoptiek van de Einstein Telescope centraal. Hieronder staat een nadere toelichting.

2. Uitdaging samengevat

Om aan de eisen voor ET-suspensies te voldoen, zijn nieuwe mechanische ontwerpen/configuraties van seismische isolatoren nodig: de ontwikkeling van verbeterde traagheids- en relatieve verplaatsingssensoren, de implementatie van geavanceerde besturingsmethoden en vooruitgang op het gebied van dataconversie-elektronica met lage frequentie en weinig ruis, en de implementatie van geavanceerde besturingsmethoden. Voor ET-Low Frequency (ET-LF) interferometers moeten oplossingen worden bedacht om overvloedige trillingen te verminderen die worden doorgegeven via de mechanische interface tussen de cryokoelers en de cryogene stadia van de spiegelophanging. Ten slotte zijn er nog extra uitdagingen voor de ET in-vacuümmechanica op het gebied van materialen en hun verwerkings- en verbindingmethoden.

3. Uitdaging van trillingsisolatie in meer detail

Grondtrillingen zijn een belangrijke bron van ruis in aan de aarde gebonden laserinterferometer-detectoren voor zwaartekrachtgolven. Omgevingsgeluid van seismische aard, veroorzaakt door natuurlijk microseismiek en menselijke activiteiten, zou verplaatsingen van de optica van de interferometers veroorzaken die tien orden van grootte groter zijn dan het effect dat verwacht wordt van gravitatiegolfsignalen. Om deze reden worden seismische isolatiesystemen gebruikt als mechanische interface tussen de omgeving en de optiek van de detector.

Seismische isolatoren zijn complexe mechatronische systemen die compatibel zijn met ultrahog vacuüm (UHV) en die de volgende hoofdfuncties hebben: langzame grootschalige positionering en uitlijning; onderdrukken van trillingsruis onder de gevoeligheidseisen in de waarnemingsband van de detector (10Hz-10kHz voor interferometers van de huidige generatie zoals LIGO en VIRGO); verminderen van de totale RMS-beweging van elk hangend optisch element, in het bijzonder de bijdragen van veerresonanties en oceanische microseismische pieken. Deze functies worden bereikt door een actief bestuurd platform van zes vrijheidsgraden te combineren met een keten van passieve mechanische filters, waarvan de laatste fase de hangende optiek zelf is. Er zijn meerdere bedieningslagen op spiegelniveau en stroomopwaarts langs de keten om de uitlijning van de detector te regelen op basis van de globale (geleverd door de optische sensoren van de interferometer) en lokale (verplaatsingssensoren) foutsignalen.

In de Einstein Telescoop stelt de uitbreiding van de waarnemingsband voor zwaartekrachtgolven tot 3 Hz ons voor grote technologische uitdagingen, omdat de prestaties met enkele orden van grootte moeten worden verbeterd ten opzichte van de allernieuwste technieken voor het isoleren van laagfrequente trillingen. Cruciaal, voor het verminderen van overvloedige ruis van koppelingen in de

besturing van de globale vrijheidsgraden van de interferometer (longitudinale en angulaire uitlijning), is de onderdrukking van residuele RMS-bewegingen van de hoofdoptiek van de detector tot op nanometerniveau. Deze eis heeft te maken met beperkingen in het dynamische bereik van actuatoren en het vermogen van mechanische filters om een dergelijke door controle veroorzaakte ruis buiten de waarnemingsband van de interferometer te houden. De oplossing voor dit probleem vereist een multilaterale aanpak:

- Reductie van de RMS-beweging van het seismische platform: actieve trillingsisolatie is gebaseerd op terugkoppeling en feedforward ruisonderdrukking op basis van foutsignalen van versnellingsmeters met hoge resolutie; betere prestaties kunnen worden bereikt door de ontwikkeling van laagfrequente (0,01-1Hz) ultralage ruis inertiële rotatiesensoren om tiltvervuiling uit versnellingsmetersignalen te onderdrukken.
- Vermindering van de RMS-beweging van de keten van mechanische filters: verbeterde demping van de starre lichaamsmodi van de passieve isolatieketen kan worden bereikt met nieuwe geoptimaliseerde mechanische configuraties met lokale controles op basis van relatieve verplaatsingssensoren met ultralage ruis.
- Verbetering van het dynamische bereik van de terugkoppelingsactuatoren: vermindering van de krachtinvoer moet gepaard gaan met verbetering van de dynamica van de actuatoren, met name die dicht bij de spiegel. In dit verband moet de ontwikkeling van nieuwe digitaal-naar-analoog (DAC) converters met ultralage ruis en geoptimaliseerde prestaties bij lage frequenties (0,01-1Hz) als een prioriteit worden beschouwd.
- Vermindering van de relatieve beweging tussen verschillende suspensies: de optische vrijheidsgraden van de detector die het meest kritisch zijn voor de injectie van stuurruis zijn die waarbij de optiek in het centrale gebied van de interferometer betrokken is: vermogens- en signaalrecyclagespiegels, bundelsplitser, ingangstestmassa's. De bewegingsinhoud van deze vrijheidsgraden kan aanzienlijk worden verminderd door de relatieve positie tussen verschillende suspensies te stabiliseren met behulp van in-vacuüm interferometrische optische koppelingen.

Drie van de zes interferometers van de Einstein Telescoop, de zogenaamde ET-LF's, zullen werken met spiegels die gekoeld zijn tot minder dan 20 K om de prestaties bij lage frequenties te optimaliseren. Dat temperatuurbereik vereist geleidingskoeling, wat betekent dat er een permanente mechanische verbinding (heat-link) tussen de cryokoeler en de laatste stadia van de ophanging, d.w.z. de spiegel en zijn stuurtrap, tot stand moet worden gebracht. Een ideale cryokoeler introduceert geen trillingen die het seismische omgevingsgeluid overschrijden. Dit is op zich echter geen garantie dat de warmteverbinding het restbewegingsniveau van de spiegel niet bederft. De oplossing voor deze complexe uitdaging ligt in de ontwikkeling van thermomechanische verbindingen met zeer lage stijfheid en lage effectieve massa en in de ontwikkeling van actieve trillingsisolatie voor de koude kant van de warmteverbinding zelf.

ET-mechanica stelt ook uitdagingen op het gebied van materialen. Seismische isolatoren maken gebruik van metaallegeringen van het type maragingstaal voor de vervaardiging van de elastische elementen van de ophangingen, vanwege hun ultrahoge sterkte en lage kruip/akoestische emissie-eigenschappen. Deze componenten worden permanent belast tot 75% van de vloeispanning van het materiaal en hun potentiële falen vormt een ernstig risico voor de continue werking van de detector, vooral als je bedenkt dat er meer dan 5000 cantilever bladveren in gebruik zullen zijn in de Einstein Telescoop. Om deze reden is het wenselijk om metaallegeringen te bestuderen en/of te valideren die een alternatief vormen voor maragingstaal, waarvan de ervaring van VIRGO heeft geleerd dat de betrouwbaarheid wordt beperkt door de gevoeligheid voor waterstofbrosheid.

Een technologische uitdaging ontstaat uiteindelijk in de latere stadia van de cryogene spiegelophanging in de ET-LF interferometers, waar het gebruik van alleen monokristallijn silicium of saffier mechanische componenten verplicht is. In deze omgeving moeten nieuwe verbindingstechnieken worden ontwikkeld die het mogelijk maken om verschillende elementen omkeerbaar met elkaar te verbinden (metaal-op-kristal en kristal-op-kristal), zonder de lage mechanische verliezen en thermische weerstand van de assemblages in gevaar te brengen.

4. Specifieke doelstelling(en) voor dit domein

Binnen dit domein zijn er een aantal specifieke uitdagingen waarbij de inbreng van het bedrijfsleven is gewenst. Een eerste rangorde van de doelstelling ziet er als volgt uit:

Hoge prioriteit (veelgevraagde R&D voor ET)

- Ultralage-ruis digitaal-naar-analoog omzetter geoptimaliseerd voor frequenties 0,01-10Hz.
- Studie en validatie van ultra hoogsterkte metaallegeringen als alternatief voor maraging staal 250 en 300 voor de fabricage van de elastische elementen van de suspensies.
- Cryogene compatibele hoog-betrouwbare thermomechanische interfaces gecombineerd met actieve trillingsisolatie voor het verbinden van cryokoeler en ophangingslading in ET-LF.
- Verbindingsmethoden voor omkeerbare verbindingen tussen monokristallijne componenten en tussen metalen en monokristallijne onderdelen.

Middelhoge prioriteit (iets waar we (ET-NL) al druk mee bezig zijn en we kunnen profiteren van expertise uit de industrie)

- Seismische isolatoren met residuele RMS-beweging op nanometerniveau voor ET-kernoptiek: conceptstudie, technisch ontwerp, prototyping, optimalisatie van residuele RMS-bewegingscijfers door toepassing van geavanceerde controlemethoden en algoritmen, ontwerp voor productie.
- Interferometrische optische koppelingen om volgen met lage frequentie tussen hulpoptiek en kernoptiek te implementeren voor onderdrukking van strooilichtruis.
- Relatieve verplaatsingssensoren met ultralage ruis voor demping van veerresonanties.
- Inertiële rotatiesensoren met ultralage ruis voor actieve kantelisolatie.
- Seismische isolatoren voor optische hulpmiddelen: ontwikkeling van een gestandaardiseerd modulair technisch ontwerp, prototyping.

Lage prioriteit (niet cruciale R&D voor ET)

- Actieve trillingsisolatiesystemen voor de optische laserbanken in de lucht.

5. Gerelateerde projecten

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

- ET Technologies: In dit project werd, met betrekking tot trillingsdemping, gewerkt aan een cryogene compatibele actieve trillingsisolator voor de koude vinger van de cryokoeler in ET-LF; het technologiedemonstratiemodel is gepland om getest te worden in ETpathfinder.
- E-TEST: in dit project is een alternatief ontwerp voor het seismische platform bestudeerd en geïmplementeerd in een prototype op ware grootte. Het systeem bestaat uit een actieve isolator met zes vrijheidsgraden die een omgekeerde slingertrap ondersteunt om de demping van de microseismische piek door de oceanen te versterken. De besturing van het

systeem maakt gebruik van geavanceerde versnellingsmeters en verplaatsingssensoren op basis van laserinterferometrische uitlezing. De isolator ondersteunt een cryogene dubbele slingerlading waarvan de tweede trap een dummyoptiek van 100 kg is. Het prototype-experiment E-TEST bevindt zich momenteel in het Centre Spatiale de Liege (CSL).

- ERC OmniSense-project: in dit project wordt een seismometer met zes vrijheidsgraden en laserinterferometrische uitlezing ontwikkeld en gedemonstreerd bij de besturing van een actief trillingsisolatieplatform. Er wordt verwacht dat het nieuwe inertiaële detectieconcept aanzienlijke vooruitgang zal brengen in kantelstabilisatie. Het OmniSense-experiment wordt gebouwd op Nikhef, Amsterdam.
- ETpathfinder: deze faciliteit in Maastricht is de belangrijkste R&D-infrastructuur voor de Einstein-telescoop in de EMR Euregio. Het bestaat uit twee complete interferometers, met cryogene kernoptiek, met hetzelfde complexiteitsniveau als een zwaartekrachtgolfdetector. De spiegels worden opgehangen in een ultrahoog vacuüm door gebruik te maken van de allernieuwste technologie; de infrastructuur zal echter het testen van geavanceerde ophangingsregelingen en nieuw ontwikkelde componenten mogelijk maken.