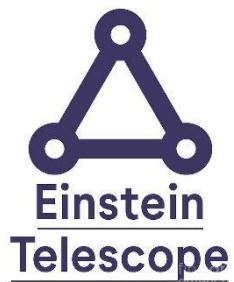


DOMEIN 5 - THERMISCHE DEFORMATIES



Output Programmacommissie Fase 2

Domein 5: Thermische deformaties

Uitdaging: Ontwikkeling van technologie om thermisch geïnduceerde vervormingen te controleren en te compenseren

Versie 1.0 (22.2.24)

Output Programmacommissie Fase 2: Domein 3 – Thermische deformaties

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 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 van 19 augustus tot en met 20 oktober met een budget van maximaal € 2.250.000,00.

Uitwerking technologiedomein Thermische deformaties

1. Introductie

Detectoren van zwaartekrachtgolven gebruiken krachtige laserstralen om de kilometerslange afstand tussen supergepolijste spiegels te meten. Het interferometrische proces vergelijkt twee bundels voor een differentiële meting. Om de interferometer de extreme gevoeligheid te laten bereiken die voor Einstein Telescope (ET) wordt beoogd, moeten de optische verliezen in het systeem niveaus van tientallen ppm bereiken en moet het golffront van de hoofdlaser onvervormd blijven om contrastdefecten op een vergelijkbaar niveau te bereiken. Hieronder staat een nadere toelichting.

2. Uitdaging samengevat

Elk defect in de grote optiek van de Einstein Telescoop kan de prestaties van de detector op verschillende manieren verminderen, bijvoorbeeld via optisch verlies, door vervorming in de stuursignalen van de interferometer of door het opwekken van stralingsdrukgestuurde resonanties in het opto-mechanische systeem. Niet alle defecten kunnen worden vermeden tijdens de fabricage. We gebruiken optische uitlezingen van de hoofdlaserbundel om extra vervormingen te meten en te beperken.

We hebben ruimtelijk opgeloste, zeer nauwkeurige metingen van de optische fase op verschillende locaties nodig. Er moet een gedetailleerd opto-mechanisch model worden gebruikt om een globaal detectie- en regelsysteem te ontwerpen. We moeten informatie over individuele defecten afleiden uit de globale toestand van de interferometer. Tot slot moeten we contactloze actuatoren ontwikkelen die de gemeten optische defecten in-situ kunnen verminderen of compenseren.

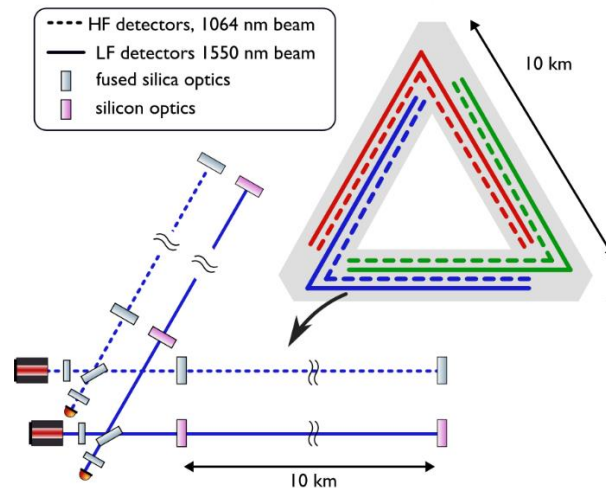
Kortom, we hebben een continu en contactvrij detectie- en regelsysteem nodig met een interferometrische fasenauwkeurigheid van beter dan 10^{-14} voor een 10 km lange interferometer met vrij bewegende spiegels met een massa van ongeveer 200 kg.

3. Uitdaging van thermische deformaties in meer detail

De transversale ruimtelijke eigenschappen van een laserbundel spelen een belangrijke rol in de laserinterferometers van de Einstein Telescoop. Elk verschil in de vorm van de hoofdlaserbundel tussen de interferometerarmen veroorzaakt imperfecte interferentie, wat leidt tot signaalverlies. Bovendien worden radiofrequente zijbandcomponenten van de bundel gebruikt om de positie en oriëntatie van de interferometeroptiek uit te lezen. Elke ruimtelijke vervorming van deze velden kan leiden tot systematische fouten in de optische uitlezing, waardoor de regelsystemen de spiegels verkeerd richten, wat leidt tot signaalverlies. Daarnaast zijn verschillende opto-mechanische systemen afhankelijk van een gecontroleerde vorm van de bundel, en afwijkingen kunnen de oorzaak zijn van instabiliteiten, zogenaamde parametrische instabiliteiten, en hoekcontrole-instabiliteiten, die het onmogelijk kunnen maken om de interferometer operationeel te krijgen en te houden.

De huidige Virgo en LIGO interferometers hebben veel last gehad van dergelijke problemen. In Virgo en LIGO in het bijzonder is de thermische vervorming van het optisch systeem als gevolg van de resterende zeer kleine absorptie van de laserbundels met hoog vermogen een groot probleem, dat het gebruik van het volledige laser Vermogen tot vandaag verhindert. Gedetailleerde studies met deze experimenten hebben geleid tot de identificatie van de belangrijkste uitdagingen die we voor ET moeten aanpakken.

De Einstein Telescope bestaat uit drie detectoren die samengevouwen zijn in een driehoek. Iedere detector wordt gevormd door twee interferometers, een voor de laagfrequente zwaartekrachtsgolven (LF) en een voor de hoogfrequente zwaartekrachtsgolven (HF). In totaal huisvest de Einstein Telescope daarom zes 10 km lange interferometers.



Het gebruik van twee interferometers voor elke detector, één werkend bij hoog optisch vermogen (ET HF) en één bij laag optisch vermogen (ET LF), helpt om de invloed van de thermisch geïnduceerde effecten te verminderen. Resterende bundelvormdefecten moeten echter nog steeds worden gecontroleerd en onze huidige hulpsystemen voor het meten en compenseren van spiegeldefecten voldoen niet aan de ET-eisen.

Nauwkeurige golffrontmetingen: we kunnen optische uitlezingen van de hoofdlaserbundel of van RF-componenten die meebewegen met de hoofdbundel gebruiken om golffrontfouten te meten en daaruit de defecten af te leiden van de 7 hoofdoptieken in de grote interferometer. De bundel is van uitstekende kwaliteit in fase, amplitude en vorm en levert dus een zeer nauwkeurige aflezing. Maar omdat het de impact van 7 optieken in gekoppelde optische resonatoren mengt, is de afleiding van deze metingen een uitdaging. Nauwkeurigere golffrontsensoren, met een hoge ruimtelijke en tijd oplossing, kunnen de basis vormen voor een krachtiger systeem.

Detectie van de hulpspiegelkwaliteit: Sommige specifieke defecten, zoals vervormingen door puntabsorbers in de spiegelcoating, kunnen veel nauwkeuriger worden gemeten met een speciale hulpbundel dan met de optische uitlezing van de hoofdbundel. Speciale Shack-Hartmann en Hartmann sensoren zijn ontwikkeld en getest in LIGO en Virgo, maar voldoen nog niet aan de ET eisen. Bovendien zijn deze tot nu toe gericht op oppervlaktevervormingen, terwijl een thermisch geïnduceerde gradiënt van de brekingsindex in het hoofdmateriaal het dominante probleem kan zijn, vooral in de hoofdbundelsplitser met de gecompliceerde geometrie van 4 invallende bundels.

Afleiding van de interferometertoestand uit optische detectie: golffrontwaarnemingen van de hoofdbundel leveren informatie over de globale toestand van de interferometer, door de gecombineerde vervormingen van 7 optieken (reflecties en transmissies) te meten. We zijn succesvol geweest in het ontwerpen van schema's voor positie- en oriëntatieregeling, die alle vrijheidsgraden van de optische systemen kunnen uiteenrafelen uit de uitlezingen van de hoofdbundel. Een soortgelijk schema is nog niet volledig gedemonstreerd voor het meten van vervormingen van spiegeloppervlakken.

Modellering van de optomechanische dynamica van de interferometer: De toestand van de interferometer hangt het sterkst af van de positie en oriëntatie van de spiegels. De regelkringen voor deze vrijheidsgraden kunnen worden beïnvloed door veranderingen in de vorm van de bundel.

Stralingsdrukeffecten veroorzaken extra koppelingen tussen de optica en hun mechanische ophangsystemen, wat leidt tot een nauw gekoppeld systeem dat meer dan 10 km lang is en optische, mechanische en elektronische regelsystemen koppelt. De meeste systemen zijn zeer niet-lineair en gekoppeld via meerdere kanalen, tenzij het systeem zich al in een stabiele toestand bevindt in een zeer klein volume van de beschikbare parameter ruimte. Vanwege dit specifieke type optische en opto-mechanische koppeling dat inherent is aan de ET interferometers, kunnen we geen modelagnostische inferentiemethoden gebruiken, maar zijn we afhankelijk van gedetailleerde numerieke modellen van de hardware. Door nauw samen te werken met de Virgo- en LIGO-detectoren moeten we modellen ontwikkelen die correct overeenkomen met de gemeten gegevens van de belangrijkste typen fouten gerelateerd aan spiegeloppervlakdefecten.

Contactloze compensatie van spiegelvervormingen: In de huidige detectoren gebruiken we ruimtelijk gestuurde verwarming van de spiegels om thermisch geïnduceerde defecten te compenseren. Verschillende soorten actuatoren zijn speciaal ontwikkeld voor gebruik in GW-interferometers, zoals ringvormige verwarmers, gesegmenteerde verwarmingsarrays en CO₂-lasers die een programmeerbaar warmteprofiel op het spiegeloppervlak kunnen leveren. Sommige van deze systemen kunnen verder ontwikkeld worden voor ET-HF, dat gesmolten siliciumdioxide optica gebruikt bij kamertemperatuur. Maar voor ET-LF, met de hoofdspiegels op een cryogene temperatuur onder 20K, kan dezelfde benadering niet worden gebruikt. We moeten een nieuw contactloos schema ontwikkelen voor golffrontcompensatie in cryogene omgevingen.

Adaptieve optiek in hulpsystemen: de optische hulpsystemen rond de hoofdinterferometer maken gebruik van optische telescopen, periscopen, Faraday isolatoren, enz. Elk optisch defect in deze systemen kan de signalen van de hoofdinterferometers maskeren. We zijn bijvoorbeeld van plan om kleine-bundel stuurinrichtingen te gebruiken om de optische bundels gecentreerd te houden op optische sensoren, zelfs als de oriëntatie van de hoofdspiegels verandert. Deze systemen moeten deel uitmaken van een gecombineerd systeem dat golffrontvervormingen en uitlijnfouten in hulpsystemen kan compenseren. In de meeste hulpsystemen is de straal van de optische bundel aanzienlijk kleiner dan in de hoofdinterferometer (een paar mm tot een paar cm) en we verwachten dat bekende technieken uit de adaptieve optica gebruikt kunnen worden in deze systemen.

Oppervlaktekwaliteit van optiek met vrije vorm: de huidige optiek voor detectoren voor zwaartekrachtgolven is afhankelijk van de nieuwste polijstechnieken die beschikbaar zijn voor bolvormige oppervlakken. In de afgelopen decennia hebben we een uitgebreide kennis ontwikkeld over cilindrische substraten met supergepolijste sferische oppervlaktevormen. Voor sommige toepassingen zou vrije-vorm optiek echter interessante voordelen bieden, bijvoorbeeld door de footprint van hulpsystemen te verkleinen of door compactere bundel-expander-telescopen in de hoofdinterferometers mogelijk te maken. We moeten een demonstratiemodel ontwikkelen om de prestaties van moderne vrije-vorm optica te testen, door de hele keten heen, vanaf het formuleren van eisen, fabricage, validatie en bedieningsgemak.

4. Specifieke doelstelling(en) binnen dit domein

Binnen dit domein zijn er een aantal specifieke uitdagingen waarbij de inbreng van het bedrijfsleven is gewenst. Deze uitdagingen zien er als volgt uit:

- Wavefront sensing bij RF modulatiefrequenties, met hoge ruimtelijke en temporele resolutie.
- Hulpsystemen om vervormingen van spiegeloppervlakken lokaal te volgen.
- Inferentie van bundel- en spiegelvervorming binnen het volledige optische systeem uit golffrontsensorgegevens.

- Modelling van een complex opto-mechanisch systeem van 7 hangende spiegels met een nauwkeurigheid van sub-pm RMS and 10^{-20} m in the measurement zone.
- Contactloze actuatie van golffronten van de belangrijkste testmassa's (d.w.z. over een gebied van >50 cm).
- Adaptieve golffrontcorrectie in bundeltelescopie voor hulpsystemen.
- Vrije-vorm optiek met een golffrontkwaliteit vergelijkbaar met supergepolijste sferische of parabolische optiek.

5. Context van het technologiedomein thermische deformaties

Detectoren van zwaartekrachtgolven gebruiken krachtige laserstralen om de kilometerslange afstand tussen supergepolijste spiegels te meten. Het interferometrische proces vergelijkt twee bundels voor een differentiële meting. Om de interferometer de extreme gevoeligheid te laten bereiken die voor ET wordt beoogd, moeten de optische verliezen in het systeem niveaus van tientallen ppm bereiken en moet het golffront van de hoofdlaser onvervormd blijven om contrastdefecten op een vergelijkbaar niveau te bereiken. Hieronder staat een nadere toelichting.

Delen van het optische systeem in ET kunnen meerdere MW continu laser vermogen aan. Restabsorptie zorgt ervoor dat de optische testmassa's opwarmen en mechanisch vervormen, wat op zijn beurt leidt tot golffrontvervalsingen en hoger optisch verlies door verstrooiing. Om dit effect te beperken, voorzien we een feedbacksysteem met gesloten lus dat continu de kwaliteit van de optische bundel meet en contactloze activering gebruikt om de vervorming van de testmassa's te corrigeren.

Soortgelijke systemen zijn ontwikkeld voor de huidige detectoren LIGO en Virgo, en we kunnen profiteren van ontwikkelingen in adaptieve optica op andere gebieden. We worden echter geconfronteerd met extra uitdagingen die specifiek zijn voor onze toepassingen: de vereiste golffrontnauwkeurigheid voor de hoofdbundel ligt op een niveau waarop gewone golffrontsensoren niet volstaan. Ruimtelijk opgeloste fase- en intensiteitsmetingen bij RF-frequenties en een hoge temporele en ruimtelijke resolutie zijn vereist. Daarnaast vereist de interpretatie van de sensorgegevens een gedetailleerd model van het dynamische gedrag van een complex opto-mechanisch systeem. De stralingsdruk van de laserbundel vormt een sterke elastische koppeling tussen de spiegels, waardoor een zeer complex opto-mechanisch systeem ontstaat dat zich uitstrekt over de gehele 10 km van de Einstein Telescoop. Zogenaamde parametrische instabiliteiten kunnen zich onder specifieke omstandigheden ontwikkelen en resonanties van de gekoppelde opto-mechanische resonatoren opwekken.

Last but not least hebben we alleen ervaring met contactvrije golffrontcorrectie bij kamertemperatuur, terwijl voor sommige systemen in ET een dergelijke actuatie nodig kan zijn bij of in de buurt van spiegels bij cryogene temperaturen (10K).

6. Gerelateerde projecten

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

- Finesse: Dit project ontwikkelt geavanceerde software voor het modelleren van het optische systeem in detectoren voor zwaartekrachtgolven. De software bevat veel speciale eigenschappen van de ET interferometers, zoals vervorming van het spiegeloppervlak, optische veren, RF detectie, complexe terugkoppelingsschema's en injectie van squeezed

licht. De software wordt wereldwijd gebruikt in alle zwaartekrachtgolfprojecten. De projectontwikkeling wordt geleid en gecoördineerd door Nikhef in Amsterdam.

- Virgo Phase Camera: De Virgo gravitatiegolfdetector bij Pisa is een grote faciliteit die ondersteund wordt door een internationale samenwerking. Nikhef levert zogenaamde Phase Camera's voor de hoofdinterferometers. De Nikhef Phase Camera maakt gebruik van een scanning beam systeem en RF modulatie om ruimtelijk opgeloste metingen te doen van het golffront van verschillende RF componenten van de hoofdbundel. De eerste versie van de Phase Camera werkt in de Virgo-detector. Op Nikhef in Amsterdam loopt een onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma voor toekomstige upgrades van het systeem.
- ETpathfinder: deze faciliteit in Maastricht is de belangrijkste O&O-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 modernste technologie. De interferometerconfiguraties zullen verschillen van de optische lay-out van de Einstein Telescoop, maar de infrastructuur zal het testen van geavanceerde optische sensoren en mogelijk nieuw ontwikkelde actuatoren mogelijk maken.