

IN VACUÛM KRIJG JE HET PAS KOUD

De toekomstige Einstein Telescoop moet nog nauwkeurigere metingen aan zwaartekrachtgolven opleveren. Voordat het zover is, staan er nog flink wat technologische uitdagingen in de weg. Een daarvan is het creëren van het benodigde ultrahoge vacuüm.

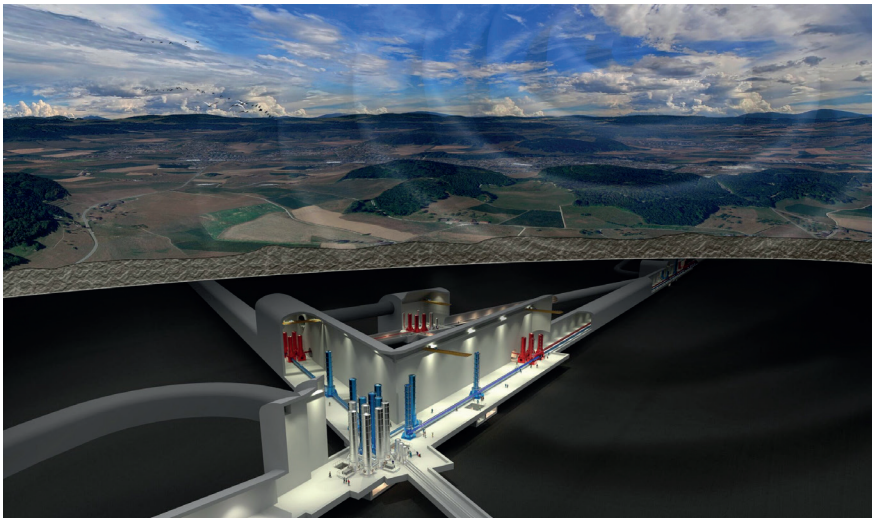
Sinds de eerste waarneming van gravitatiegolven in 2015 door de LIGO-observatoria, is binnen de fysica wereldwijd grote belangstelling voor grotere en nog nauwkeurigere instrumenten. De Europese Unie bereidt de constructie van de volgende generatie gravitatiegolventelescoop voor: de Einstein Telescoop (ET). De bedoeling is de precisie met een factor duizend te verbeteren ten opzichte van de huidige detectoren door onder andere het trillingsvrij ophangen en afkoelen van de spiegels waaruit de interferometers zijn opgebouwd. Om achtergrondtrillingen te onderdrukken komt de telescoop ongeveer driehonderd meter onder de grond te liggen. Verder zullen meerdere detectoren, werkend op verschillende golflengten, worden gecombineerd (zie figuur 1). Een van de mogelijke locaties is het gebied ten zuiden van Maastricht: het grensgebied van België, Duitsland en Nederland. Om de nieuwe technologie alvast te ontwikkelen, wordt sinds een paar jaar de Einstein Telescoop PathFinder (ETPF) opgebouwd in Maastricht. Om in de toekomst op grote schaal te kunnen produceren voor de ET, worden nu al meerdere technologieën in samenwerking met de industrie doorontwikkeld. Vacuümtechnologie is nodig om verstrooiing van het laserlicht te onderdrukken, de optica schoon te houden en akoestische bronnen weg te nemen. Het

gaat hier om de grootste ultrahoogvacuümruimte ter wereld: de ET is grofweg een gelijkzijdige driehoek met zijden van tien kilometer! Het is dus niet verwonderlijk dat binnen het ETPF-programma industrie en academici samenwerken om de productie van al die kilometers hoogwaardige vacuümbuizen en verdere vacuümtechnologie te realiseren. Het vacuüm van de Einstein Telescoop dient nog een extra doel, namelijk het bereiken van de vereiste lage temperaturen om thermische ruis in de optica weg te nemen. Om koelvermogen te creëren wordt vaak gebruikgemaakt van een thermodynamische cyclus. Een gas wordt eerst gecompriëerd op een hoge temperatuur. De warmte die daarbij ontstaat, wordt aan de omgeving afgegeven. Door vervolgens het gas, dat onder hoge druk staat, gecontroleerd te laten expanderen, koelt het af en kan het daarmee warmte opnemen uit de omgeving. Dit kan worden gebruikt om bijvoorbeeld detectoren te koelen. Echter, de meeste (cryogene) koelmethodes maken gebruik van mechanische principes om het gas te comprimeren. Die mechanische compressors vormen een bron van trillingen. Marcel ter Brake deed bij de Twentse vakgroep EMS jarenlang onderzoek naar het combineren van sorptietechnologie om gassen trillingsvrij te comprimeren, waarbij geactiveerd kool op lage temperatuur gassen bindt. Door de kool vervolgens te verwarmen komt

het gas vrij. Door twee terugslagkleppen te gebruiken, kan hiermee druk worden opgebouwd, vergelijkbaar met hoe ons eigen hart bloed rondpompt. Een consortium van Demcon Kryoz, Cooll en EMS gebruikt dit concept voor de bouw van trillingsvrije koelers, die de optica van ETPF tot tien kelvin gaan afkoelen en zo de thermische ruis in de detectoren wegnemen. De sorptiecompressor wordt hier gecombineerd met een restrictie om het vereiste koelvermogen te leveren, het zogeheten Joule-Thomson-effect. Het vacuüm is hierbij essentieel om de detectoren thermisch te isoleren en de optica naar deze lage temperaturen te krijgen.

Vacuümtechnologie verandert thermische vraagstukken

Als je iets wilt afkoelen, heb je ten eerste een koellichaam nodig, maar ten tweede moet je het goed isoleren: door de warmtestroom vanuit de omgeving te limiteren kost het koelen minder energie en kunnen lagere temperaturen bereikt worden. Vacuümtechnologie biedt hier op meerdere manieren uitkomst. Ten eerste gaat het verwijderen van lucht in de opstelling warmtebelasting door convectie tegen. Ten tweede voorkomt vacuüm het ontstaan van warmtebelasting door latente warmte door neerslaande of condenserende gassen. Verder is vacuüm nodig omdat vocht uit de lucht voor roest kan zorgen of voor schade door kortsluiting in de elektronica. Een



Figuur 1. Schematische weergave van de Einstein Telescoop. Meerder interferometers (rood, blauw en zilver) zijn in de tunnels geplaatst. De tunnelbuizen liggen in een gelijkzijdige driehoek van tien kilometer ongeveer driehonderd meter onder de grond. De ongeveer twintig meter hoge vacuümtorens bevatten de spiegels met hun ophangstelsel en zijn onderling verbonden met vacuümbuizen. Afbeelding: Marco Kraan/Nikhef.



Michiel van Limbeek is gepromoveerd in thermische stromingsleer op het Leidenfrost-effect. Aan de UT doet hij onderzoek naar warmte-transport in de context van koeling cycli. Hij is betrokken bij de cryogene infrastructuur en leidt binnen de UT de ontwikkeling van de sorptiekoolers voor ETPF.

goed vacuüm betekent dat het initiële gas verwijderd is voordat men gaat koelen, en voorkomt ook dat nieuw gas van buitenaf kan toestromen.

Een derde warmtebron die ondervangen wordt door vacuümtechnologie is stralingswarmte. Cryogene technologie maakt vaak gebruik van zogeheten stralingsschermen. Dat zijn sterk spiegelende oppervlakken, zoals gepolijst staal of koper, die de hoogenergetische warmtestraling van de omgeving weerkaatsen en zo voorkomen dat zij op het koude object valt. Deze schilden nemen na verloop van tijd een temperatuur aan die tussen die van de warme omgeving en de koude opstelling ligt. Zonder vacuüm slaan de gassen neer of ze condenseren op de koude oppervlakken. Dit verandert vervolgens hoe spiegelend de schermen zijn: de warmtebelasting kan door dit effect bijna een factor tien sterker worden.

Vacuümeisen voor de Einstein Telescoop

Cryogene interferometrie voor detectie van gravitatiegolven vereist dat er geen restgas vastvriest op de spiegels van de interferometer. Slechts een enkele laag atomen op de spiegels kan het signaal al verstoren. Een cryogeen gekoelde spiegel een aantal maanden schoonhouden, vereist een lokale druk van 10^{-11} Pa rond het

spiegeloppervlak en een druk beneden de 10^{-8} Pa in de armen van de interferometers. Voor zo'n hoog vacuüm moeten twee soorten verontreiniging bestreden worden. Men gebruikt vaak multi-layer insulation (MLI, dubbel-gealuminiseerd kaptonfolie) om cryogene onderdelen af te schermen van de omgeving op kamertemperatuur. MLI bestaat uit meerdere lagen reflecterende folie. De warmtestraling neemt omgekeerd evenredig af met het aantal lagen. Echter, MLI-folie is hydrofiel – na beluchten zou het jaren duren om het geadsorbeerde water uit de folieoppervlakken weg te pompen tot een acceptabele restdruk.

RONDLEIDING BIJ TNO

De NNV organiseert samen met vacuümvereniging NEVAC en TNO een rondleiding met lezing. Een mooie gelegenheid om meer te weten te komen over de vacuümfaciliteiten van TNO waar onderzoekers, instellingen en bedrijven van over de hele wereld voor naar Nederland komen. Zie voor meer informatie het NNV-Nieuws op pagina 31.

WARMTE-TRANSPORT: HOE EN WAT?

Warmte kan op drie verschillende manieren worden uitgewisseld tussen twee objecten: ten eerste door middel van geleiding, beschreven door de wet van Fourier. Die stelt dat de warmtestroom q gelijk is aan de negatieve gradiënt van de temperatuur maal de thermische geleidbaarheid k van het materiaal: $q = -k \nabla T$. De tweede manier is door middel van convectie: stromende gassen of vloeistoffen nemen energie op van het hete object, transporteren dit en geven de energie af aan koudere objecten. Ten slotte kan warmte worden uitgewisseld door middel van straling. Ieder object wisselt fotonen uit met zijn omgeving door uitstraling en absorptie. De corresponderende warmtestroom hangt af van de grootte en emissiviteit van het oppervlak en schaal met de vierde macht van de temperatuur. De netto-warmtestroom tussen de objecten a en b hangt dus sterk af van het verschil in (absolute) temperatuur van de twee: $\dot{Q}_{a \rightarrow b} \sim (T_b^4 - T_a^4)$. Door stralingsschermen tussen object a en b te plaatsen, kan de warmtestroom op b sterk verminderd worden.



Figuur 2. Foto van het ETPF-lab in Maastricht. De optica wordt trillingsvrij opgehangen in de torens, die met elkaar verbonden zijn door vacuüm buizen. De torens zijn minder hoog, omdat de spiegels kleiner zijn dan die gepland in de Einstein Telescoop. Afbeelding: The ETPfinder Team.

De tweede bron van verontreiniging op de spiegels is het uitgassen van materialen. Voor spiegeltemperaturen beneden de tien kelvin dient men met name het uitgassen van waterstof te vermijden, de meest hardnekkige bron van gas uit staal. In de huidige gravitatiegolfdetectoren (Ligo, Kagra, Virgo, GEO600) zijn de drukken in de torens waarin de spiegels hangen ongeveer een factor miljoen te hoog om die lage temperaturen te bereiken. Hier brengen stralingsschermen rond de cryogene spiegels uitkomst. Die reduceren de thermische straling op de spiegels met een factor tienduizend. Het restgas uit de torens en de bundelpijp moet op de schermen vastvriezen in plaats van op de spiegel om de benodigde factor miljoen in drukwinst te realiseren. Daarnaast moeten de schilden zelf zeer weinig uitgassen.

In ETPF ontwikkelen we deze technologie in een uitgebreid programma. We modelleren de migratie van alle moleculen en de thermische straling tussen alle oppervlakken in de interferometer. Verder nemen we de interacties mee, zoals adsorptie en desorptie, permeatie in polymeren, monolaagopbouw en cetera. Ten slotte vergelijken we de modellen met de werkelijkheid door de uitgassing van onderdelen te meten als functie van de temperatuur (na beluchten) van alle componenten die in het vacuümstelsel ingebracht worden.

De cryokoeler van EMS vereist niet overal een ultrahoog vacuüm: door de compressor in een apart vacuüm te plaatsen, zijn hier materialen afdoende die nog een beetje uitgassen. Daarnaast is eventueel onderhoud plegen ook een stuk eenvoudiger als alleen het vacuüm van de compressor verbroken wordt. Via vacuümdoorvoeren kan het gas door dunne gasleidingen van en naar de Joule-Thomson-koeler getransporteerd worden om bij de spiegels het koelvermogen te leveren.

Vacuümtechnologie in een bredere context

De extreme eisen van de Einstein Telescoop zijn niet altijd nodig. Vacuümtechnologie heeft veel bredere toepassingen in het dagelijks leven. Zoals de spiegels van ET schoon en vrij van trillingen moeten blijven, zo slaagt ook de productie van chips met de nieuwste euv-machines alleen in een ultrahoog vacuüm. Andere hightechnoepassingen zijn de productie van zonnepanelen, flatscreens en dunne films.

Verder krijgt het verduurzamen van de samenleving momenteel veel aandacht. De eindige hoeveelheid fossiele energie en de bij verbranding vrijkomende broeikasgassen zorgen ervoor dat men in iedere sector nadenkt hoe verantwoord met energieconsumptie en -productie om te gaan. Een van de trends hierbij is de overstap op

vloeibare waterstof als energiedrager. Vloeibaar, want waterstof in gasvorm resulteert in zware constructies om de hoge drukken te weerstaan die voor een met fossiele brandstoffen vergelijkbare energiedichtheid nodig zijn. De luchtvaartsector beweegt in de richting van elektrisch vliegen met vloeibare waterstof als energiedrager. Supergeleiders, met voldoende koeling, kunnen gebruikt worden voor elektrische kabels en in motoren. Enkele jaren geleden is mede door de EMS-groep de eerste supergeleidende windmolen gebouwd met een groot vacuüm rondom de rotor.

Supergeleiders werken alleen bij temperaturen onder zo'n tachtig kelvin. Bij hogere temperaturen worden ze normale geleiders of zelfs isolatoren. Waterstof is pas vloeibaar onder de kritische temperatuur van 33 kelvin. Vacuümtechnologie is verder essentieel voor de cryotechnologie in MRI-systemen, zweefreinen en toepassingen van cryogene vloeistoffen. Bij veel van deze toepassingen speelt vacuümtechnologie dus een belangrijke rol: het bereiken van lage temperaturen kost veel meer energie zonder een goed vacuüm, als het al mogelijk is. Vacuüm is dus een technologie die andere technologieën mogelijk maakt.

Met de Einstein Telescoop Pathfinder als voorbeeld zagen we dat cryogene systemen vaak onlosmakelijk verbonden zijn met vacuümtechnologie. Met het verwijderen van omgevingsgas verdwijnt een grote bron van warmtebelasting, zoals het goed isoleren van een huis zorgt voor lagere verwarmingskosten. Vacuüm kan nog een tweede doel dienen, zoals in het geval van de Einstein Telescoop: niet alleen verstrooit het licht minder door de afwezigheid van gas en akoestische trillingen, het vacuüm voorkomt ook dat omgevingsgas op de koude optica neerslaat en het meetsignaal verstoort. Kortom: vacuümtechnologie zorgt op verschillende manieren voor goed functionerende optica. Met de introductie van vloeibare waterstof als energiedrager en nieuwe toepassingen van supergeleiders zal vacuümtechnologie in de toekomst meer en meer toepassingen vinden.