

ZUIVER SPIEGELBEELD

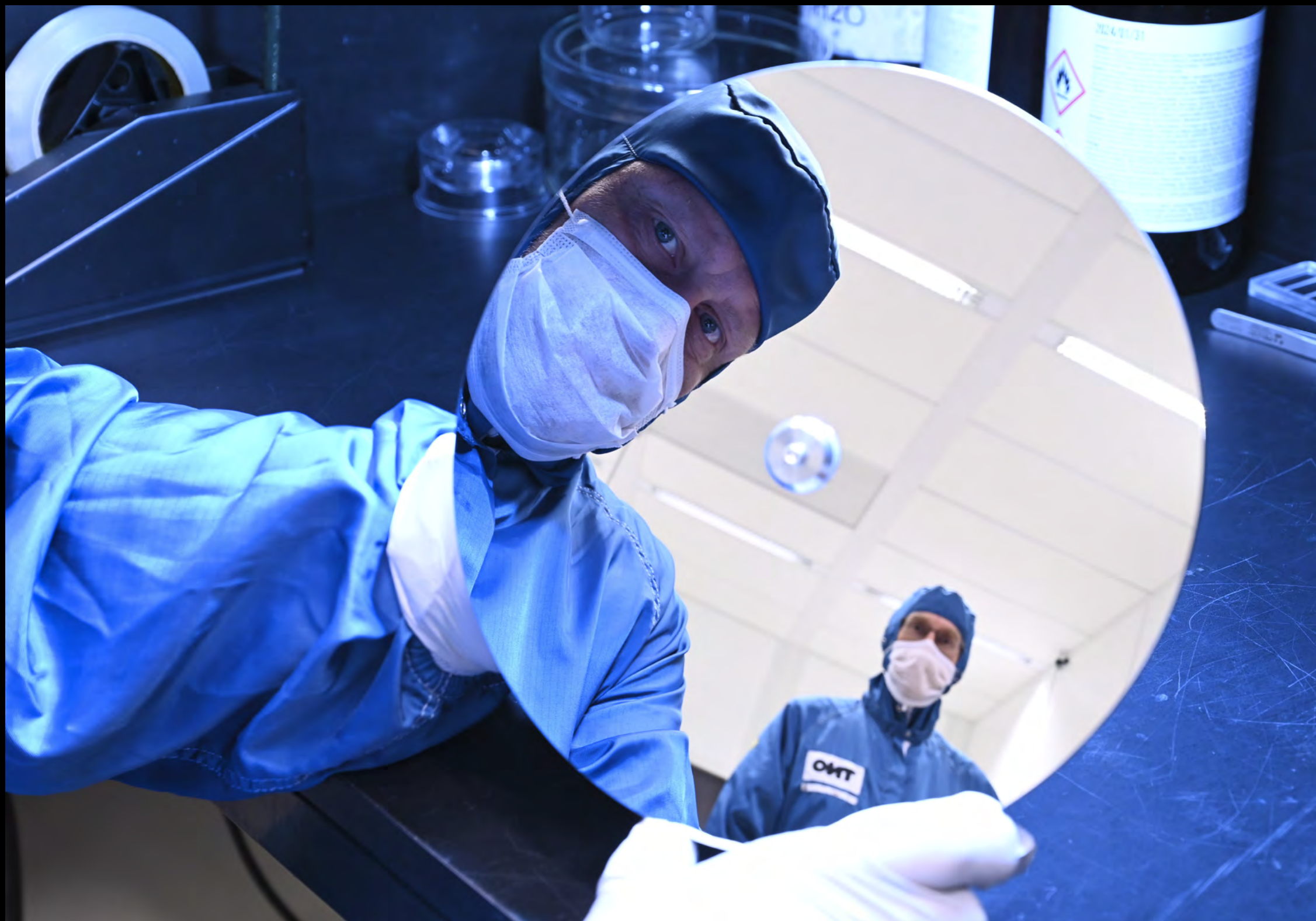
Een innovatieve spiegel van Nederlandse makelij
belooft de allerbeste telescopen nóg beter te maken.
Het prototype werd onlangs getest op de top van
de Hawaïaanse vulkaan Mauna Kea.

Tekst SANDER KOENEN
Fotografie FRED KAMPHUES

Op de top van
Mauna Kea op Hawaï
staat de Infrared
Telescope Facility
(IRTF) van NASA.
Dankzij de hoogte
(ruim vier kilometer
boven zeeniveau), de
droogte en de sta-
biele atmosferische
omstandigheden is
dit een van de beste
locaties ter wereld
voor astronomisch
onderzoek.



Bij TNO in Delft inspecteren coatingingenieur Robin van Buuren (links) en integratie- en testingenieur Kristian Boot de reflecterende aluminiumcoating van de adaptieve spiegel die het onderzoeksinstituut ontwikkelde voor de IRTF-telescoop. De spiegel is aan de achterkant voorzien van 36 'actuatoren' (regelstaafjes) die het glas kunnen vervormen.



D

DE LUCHT IS IJL EN DROOG, de hemel helderblauw op de top van de slapende vulkaan Mauna Kea. Ooit was dit het rijk van de goden: de plek waar Hemelvader Wākea en Moeder Aarde Papahānaumoku elkaar ontmoetten en waar volgens de Hawaïaanse mythologie al het leven ontsproot. Nu staat hier het grootste astronomische observatorium ter wereld, ons helderste kijkglas naar het heelal.

Het is eind april 2024 wanneer ik op deze voor Hawaïanen heilige plek astronoom Mark Chun van het Institute for Astronomy (IfA) van de University of Hawai'i ontmoet. Met blijk van ontzag laat hij zien wat mensen hier, ruim vier kilometer boven zeeniveau, hebben gebouwd: elf telescopen, gefinancierd door elf landen en gebruikt door astronomen wereldwijd. In het oog springen meteen de grote, witte koepels van de W.M. Keck-telescopen. Ze werden in gebruik genomen in de jaren negentig, maar zijn nog altijd twee van de grootste spiegeltelescopen op aarde en toonaangevend in het astronomisch onderzoek.

Ten oosten van de Keck-telescopen schuilt onder een herkenbare, zilverkleurige koepel de Infrared Telescope Facility (IRTF). NASA bouwde de infraroodtelescoop in de jaren zeventig ter ondersteuning van de Voyager-ruimtesondes tijdens hun grote ontdekkingsreis langs Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus. Nu wordt hij gebruikt voor onderzoek aan ons zonnestelsel en het diepe heelal.

Omringd door een oceaan van wolken, vinden astronomen, technici en toeristen hun weg naar de top van Mauna Kea. Heuvels van vulkanisch gesteente zijn de stille getuigen van het natuurgeweld waaruit Hawaiï ruim een half miljoen jaar geleden ontstond.

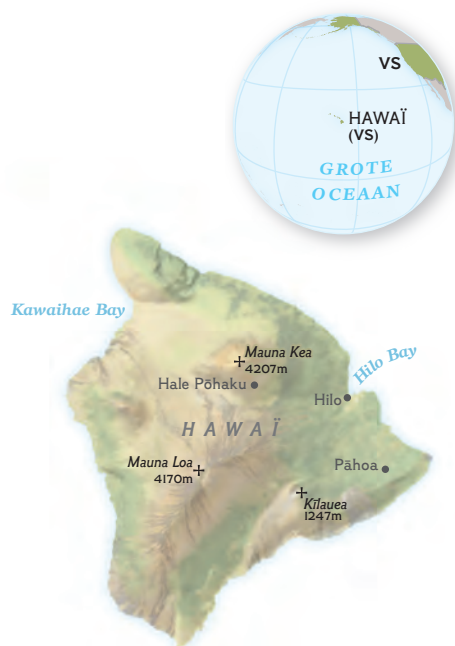


Als de nacht valt wordt me duidelijk waarom deze plek het summum voor astronomisch onderzoek is. Dankzij strenge wetten die lichtvervuiling op het eiland Hawaiï verbieden, is de lucht donkerder dan ik die ooit heb gezien. Duizenden sterren fonkelen aan de hemel als diamanten op zwart satijn. Maar het is juist deze fonkeling die Chun, met een internationale groep experts en een Nederlandse spiegel vol hightech elektronica, teniet wil doen.

Waarnemen met een telescoop kun je vergelijken met uitkijken over een meer, vertelt Chun. De sterren zijn een pittoresk huis aan

de overkant van het water. Als het windstil is, is het water spiegelglad en de reflectie van het huis niet van echt te onderscheiden. Gaat het waaien, dan komt het water in beweging en wordt het spiegelbeeld onscherp. 'Hetzelfde gebeurt als we met een telescoop door de lucht van de dampkring heen naar de sterren kijken. Bewegende luchtdeeltjes verstoren het sterrenlicht. De sterren worden onscherpe vlekken, die 'dansen' in de telescoopcamera.'

Om het verstorende effect van de dampkring te neutraliseren, ontwikkelde onderzoeksinstituut TNO in Delft een vervormbare



spiegel van ruim 24 centimeter groot. Deze wordt morgen aan de bovenkant van de telescoop geïnstalleerd, als vervanger van de huidige secundaire spiegel, en daarna drie nachten lang getest. Tot die tijd staat hij in een testopstelling in het telescoopgebouw.

Van de zijkant zie ik wat de spiegel bijzonder maakt. Achter het gepolijste spiegelglas zitten 36 kleine, regelbare staafjes. Deze 'actuators' kunnen de spiegel tientallen keren per seconde uitduwen of aantrekken op enkele nanometers nauwkeurig – één tienduizendste van de dikte van een mensenhaar. Als de actuators werken zoals verwacht, corrigeert de 'adaptieve' spiegel live de turbulentie in de dampkring – waarna de sterren haarscherp weerkaatsten, als in een spiegelglad meer.

DE VOLGENDE DAG

GLIMT DE BESCHERMKOEPSEL van de IRTF-telescoop in de felle middagzon. Binnen worstelt Chun boven zijn hoofd met de tien

kilo zware, adaptieve secundaire spiegel. Wat hij ook probeert, het lukt hem niet de spiegel te installeren. Ondertussen voelt hij hoe de ijle lucht zijn denkvermogen aantast. 'Wat hebben we gemist in de testopstelling,' vraagt hij mechanisch ingenieur Alan Ryan, zijn rechterhand. 'Waarom past hij niet?' Behoedzaam legt Chun de spiegel terug in zijn beschermkoffer en gaat zitten om op adem te komen.

Het grote probleem van werken op Mauna Kea, vertelde Chun me eerder, is dat je niet precies weet wanneer je lijdt aan zuurstofarmoede. 'Op 4200 meter hoogte kun je briljante ideeën ervaren. Om er op de Saddle Road terug naar beneden achter te komen dat je een volle werkdag hebt weggegooid.' Juist daarom zijn alle procedures voor de installatie van deze spiegel wekenlang minutieus getest in een laboratorium op zeeniveau.

Eén onderdeel in de laboratoriumsimulatie was niet honderd procent accuraat, blijkt nu bij de installatie. De bevestigingsmoeren op de telescoop wijken af van die in de bouwtekeningen en dus ook van die werden gebruikt in de testopstelling. Daarom sluit de spiegel niet goed aan en heeft de fijngevoelige elektronica aan de achterkant onvoldoende ruimte.

Vanaf de catwalk, een smal looppad halverwege de koepel van de telescoop, kijk ik samen met de Franse astronoom Olivier Lai toe op de installatie. Lai werkt voor de Canada France Hawaii Telescope op Mauna Kea. Hij is een van de grondleggers van adaptieve optica voor de astronomie en op verzoek van Chun nauw betrokken bij de aankomende spiegeltest. 'Wie nog nooit bij een telescoop van dit formaat in de buurt is geweest, onderschat al gauw hoeveel werk je moet verzetten om één waardevolle astronomische waarneming te doen,' zegt Lai. 'Het vereist niet alleen voorbereiding, doorzettingsvermogen en technische kennis, maar ook een zeker gevoel om alle optische instrumenten exact uit te lijnen.'

Met andere moeren lukt het alsnog de spiegel te bevestigen aan de bovenkant van de telescoop. Inmiddels twee uur achter op schema draagt Chun het werk over aan promovendi

Ellen Lee en Suzanne Zhang. Zij zijn verantwoordelijk voor de installatie en kalibratie van de 'golffrontsensor' en regelelektronica, nodig om de adaptieve spiegel aan te sturen als hij vannacht voor het eerst *on sky* wordt getest.

ADAPTIEVE OPTICA

IS NIET NIEUW. Zij werd in de jaren zeventig ontwikkeld door het Amerikaanse leger om vijandelijke objecten in de ruimte op te sporen. Toen twintig jaar later een deel van de geheime technologie werd vrijgegeven aan de wetenschap, zagen Lai en Chun meteen de grote toegevoegde waarde voor de astronomie. Ze bouwden de eerste generatie vervormbare spiegels voor telescopen en gaven astronomen daarmee een scherpere blik op het heelal.

In de afgelopen tientallen jaren werd de technologie steeds verder verfijnd. Ook door TNO, dat onder meer optische instrumenten, mechanica, regeltechniek en elektronica – kortweg 'optomechatronica' – ontwikkelde voor internationale satellietmissies en ASML. Ruim twintig jaar geleden maakte promovendus Roger Hamelinck bestaande technologie voor actuators robuuster, nauwkeuriger en energiezuiniger. Daarna bouwde hij, nog zonder concrete toepassing, een prototype vervormbare spiegel.

De spiegel werkte goed in het lab, totdat Hamelinck twee dagen voor de deadline van zijn promotie in 2008 een schroevendraaiertje liet vallen op het flinterdunne spiegelglas. Dat brak in duizend stukken, waarna de hardware van het experiment en de innovatieve actuator-technologie in een archiefkast verdwenen.

In 2015 pakte systeemingénieur Stefan Kuiper het werk van Hamelinck er weer bij. Aanleiding was een vraag van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA, die wilde weten of de actuator-technologie van TNO kan worden gebruikt in ruimtetelescopen. Zo zou, was de gedachte, een debacle als met de

Hubble-ruimtetelescoop – die na zijn lancering in 1990 onscherpe beelden leverde en moest worden gerepareerd – in de toekomst kunnen worden voorkomen. Een vervormbare spiegel zou eventuele onscherpte kunnen corrigeren, zelfs op miljoenen kilometers van de aarde en zonder tussenkomst van astronauten. Kuiper bouwde een nieuw prototype van de vervormbare spiegel en liet zien dat het gevraagde mogelijk was.

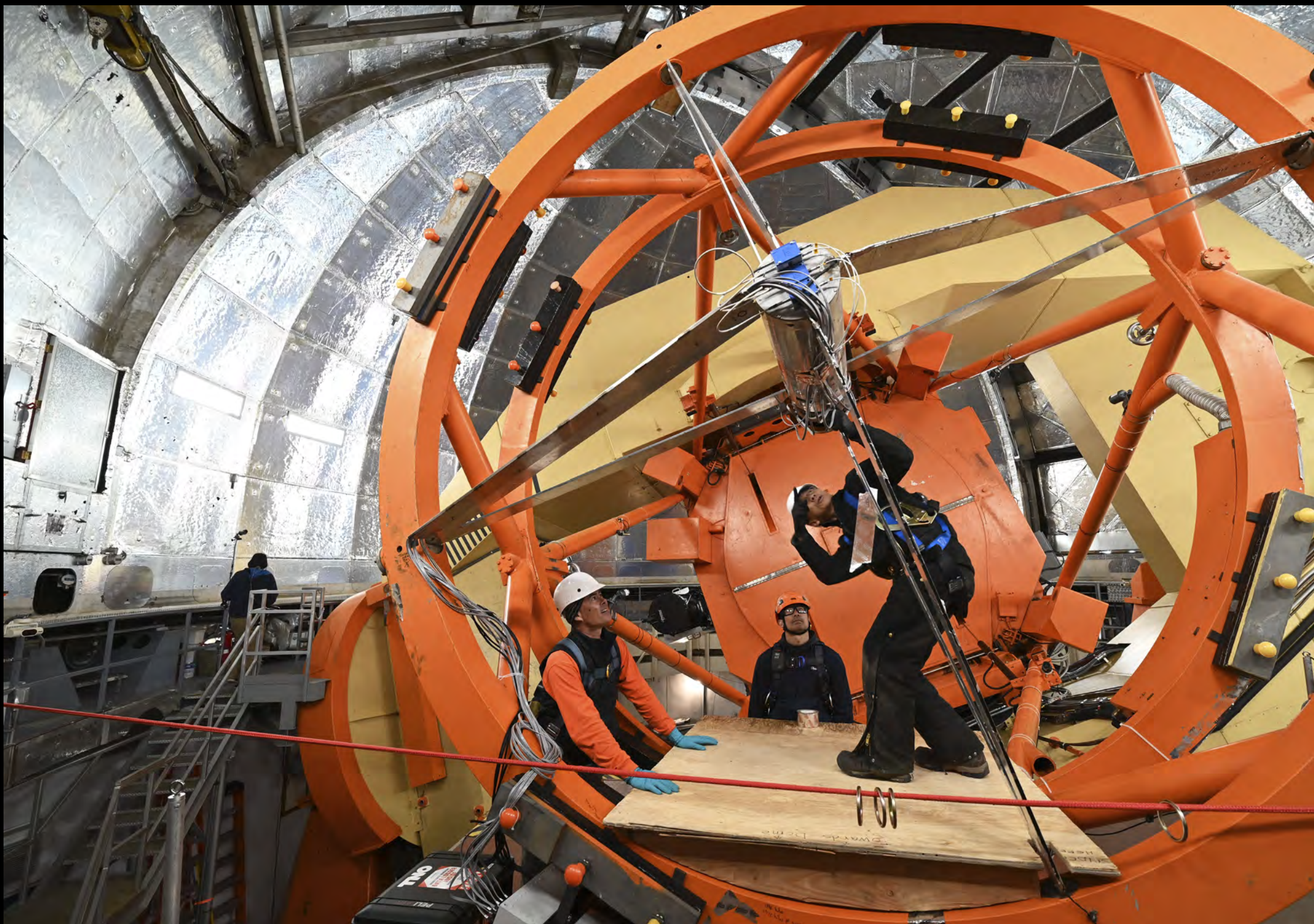
ESA besloot voorsnog geen vervolg te geven aan het project, maar TNO bleef investeren in de ontwikkeling van de actuator-technologie voor adaptieve spiegels. Prioriteit lag bij de regelstaafjes zelf. Deze moesten sterker en efficiënter worden, zodat ze veel dikker en dus ook minder kwetsbaar spiegelglas konden aansturen. En niet alleen in telescopen, zegt projectleider Wouter Jonker: 'Wij zien vervormbare spiegels als een sleuteltechnologie met diverse toepassingen, waaronder in de halfgeleiderindustrie, lasersatellietcommunicatie en bij defensie.'

Op astronomisch vlak verlegde TNO haar aandacht in 2018 naar adaptieve secundaire spiegels voor telescopen op de grond, in plaats van in de ruimte. Juist hier valt veel winst te halen, denkt Jonker. 'Op aarde kun je extreem grote telescopen bouwen voor een fractie van de kosten van een ruimtetelescoop. Bovendien kun je makkelijk bij de hardware om die te blijven aanpassen en upgraden als dat nodig is.'

TNO zette hoog in en deed een conceptstudie naar adaptieve secundaire spiegels voor een van de grootste, productiefste en meest prestigieuze observatoria ter wereld: de twee Keck-telescopen op Mauna Kea. Sommigen noemden het project een sprookje, anderen een *moonshot*. Want de 1,4 meter grote secundaire spiegels voor Keck zullen drie- tot vierduizend actuators bevatten en een regelsysteem met ongekende rekenkracht. Maar hoe moeilijk het ook moet zijn om spiegels op deze schaal te ontwikkelen en aan te sturen, de studie toonde aan dat het niet onmogelijk is.

(Lees verder op pagina 70)

Mark Chun (rechts) en Alan Ryan (links) installeren de adaptieve secundaire spiegel van TNO aan de bovenkant van de 46 jaar oude IRTF-telescoop. De installatie vindt plaats op 4200 meter hoogte, waar zuurstofarme voertuuren op de loer ligt. Om die reden zijn procedures voor de installatie op zee-niveau minutieus voorbereid en getest in een laboratorium van de University of Hawai'i in Hilo.



Toen astronoom Gerard Kuiper zestig jaar geleden een geschikte locatie zocht voor een nieuw infraroodobservatorium, stond de nog ongerepte Mauna Kea bovenaan zijn wensenlijst. Sindsdien zijn hier elf telescopen gebouwd, waaronder de IRTF (geheel rechts) en links daarvan de twee Keck-telescopen.

DE DAMPKRING GENEUTRALISEERD

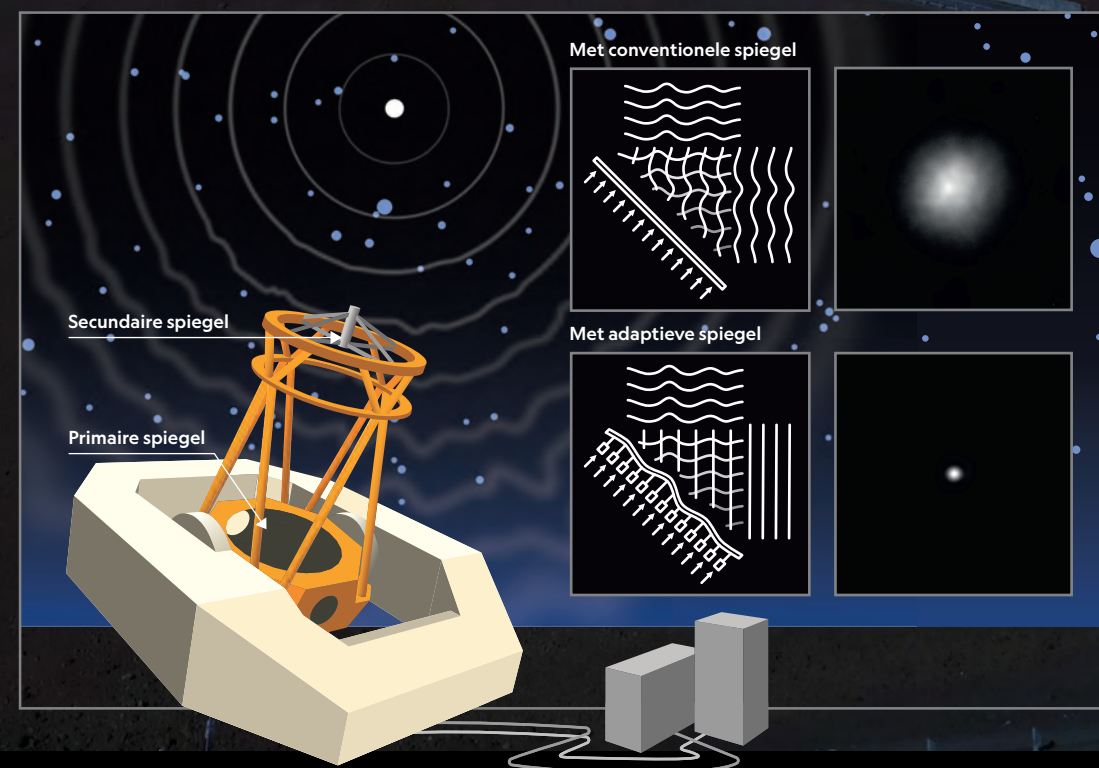
Vervormbare spiegel maakt verstrooid sterrenlicht zuiver

De IRTF-telescoop werkt als de meeste andere grote telescopen op aarde. Sterrenlicht valt op een grote, primaire spiegel. Met zijn ietwat holle vorm focusteert deze spiegel het licht op een veel kleinere secundaire spiegel. Die kaatst het licht op zijn beurt terug naar het midden van de primaire spiegel, waar het via een gat op de wetenschappelijke camera van de telescoop valt. De secundaire spiegel maakt een veel compacter ontwerp van de telescoop mogelijk, zonder dat dit ten koste gaat van de brandpuntsafstand –

de afstand tussen de primaire spiegel en de camera.

Astronomen nemen met de IRTF-telescoop licht waar dat miljoenen jaren ongehinderd door het heelal is gereisd. Totdat het in de laatste nanoseconden door turbulentie in de atmosfeer van richting is veranderd. Het gevolg: sterrenlicht 'danst' heen en weer op de telescoopspiegels. Dit leidt tot minder scherpe waarnemingen. De adaptieve secundaire spiegel van TNO kan de verstoring van de dampkring neutraliseren. Daartoe wordt een deel

van het invallende sterrenlicht omgeleid naar een golf-frontsensor. Die karakteriseert de vervorming van het sterrenlicht, waarna een regelsysteem 36 actuatoren opdraagt de secundaire spiegel in te duwen of juist aan te trekken. Vervormt de spiegel precies op de juiste manier? Dan is er sprake van een 'gesloten lus': de sterren dansen niet langer in de telescoop, en de camera maakt een haarscherp beeld. Hier te zien is Vega, de helderste ster in het sterrenbeeld Lier, zonder en met vervorming van de secundaire spiegel.



INFOGRAPHIC: PEPIN BERGHOUT/ELLEN LEE, UNIVERSITY OF HAWAII-IFA

'WE VERWACHTEN DAT DE ADAPTIEVE SECUNDAIRE SPIEGEL DE WAARNEEMKWALITEIT VAN DE IRTF-TELESCOOP MET EEN FACTOR TWEE KAN VERBETEREN.'

—MARK CHUN



Toch was er één groot obstakel: de technologie voor adaptieve secundaire spiegels was nog nooit buiten het lab getest. 'Grote telescopen als Keck zijn wetenschappelijke fabrieken. Ze kunnen het zich niet veroorloven ook maar één nacht stil te liggen,' zegt Jonker. 'Voor ze in het hart van de telescoop een secundaire spiegel monteren, willen ze er honderd procent zeker van zijn dat hij werkt. Vandaar onze test op de IRTF.'

HET DINERBUFFET

IS VROEG GEOPEND in Hale Pōhaku ('stenen huis') dat zich tussen de top van Mauna Kea en de Saddle Road bevindt. 'HP' is het basiskamp voor astronomen en telescoop-technici. Het omvat eenvoudige hotelkamers en een ruimte met loungebanken, pool- en tafeltennistafels, dartborden en een kleine bibliotheek. Alles om lange dagen en nachten met slecht weer uit te kunnen zitten.

Tijdens het diner is de spiegeltest het gesprek van de dag. Niet alleen aan de tafel van Chun en zijn team: ook ingenieurs en astronomen van andere telescopen willen weten hoe het gaat met de allereerste adaptieve

secundaire spiegel op Mauna Kea, waarvan ze hebben gehoord dat die inmiddels volledig is gemonteerd.

In de kleine academische gemeenschap van instrumentbouwers kent iedereen de kracht, maar ook de uitdagingen van adaptieve optische instrumenten. Ten eerste voegen bijna alle adaptieve systemen extra lenzen en spiegels toe aan een telescoop. Deze optische onderdelen absorberen een deel van het invallende sterrenlicht – licht dat wetenschappers juist hard nodig hebben om astronomisch onderzoek mee te doen. Ten tweede produceert de elektronica die vervormbare spiegels aanstuurt warmte. Warmte veroorzaakt extra turbulentie in de lucht en dus 'ruis' in de waarnemingen. Hoe zwakker het te onderzoeken licht, hoe groter dit probleem.

Het TNO-instrument lost beide problemen tegelijk op. Omdat de technologie is ingebouwd in de secundaire spiegel – die de telescoop van zichzelf al heeft – is geen extra glas nodig dat waardevol sterrenlicht absorbeert. En de actuatoren, ontwikkeld door Hamelinck en daarna verbeterd door Kuiper en collega's, zijn zo energiezuinig dat ze nauwelijks warmte produceren. Chun: 'De karakteristieken van de spiegel zijn aanzienlijk beter dan wat tot nu toe beschikbaar was. We verwachten dat deze adaptieve secundaire spiegel de waarneemkwaliteit van de IRTF-telescoop met een factor twee kan verbeteren.'

IN EEN JEEP

RIJD IK MET CHUN vanuit Hale Pōhaku langzaam over de flank van Mauna Kea omhoog. De banden werpen een wolk van vulkaanstof op, die schittert in het laatste zonlicht van de dag. We zien *lele*, altaren van steen en hout, die herinneren aan de spirituele waarde die deze plek voor de bevolking heeft. Even verderop ligt een oude steengroeve voor obsidiaan. Van dit vulkanisch gesteente

maakten Hawaïanen eeuwen geleden gereedschappen, waarvan resten werden gevonden in meerdere landen rond de Grote Oceaan.

Een paar kilometer voor de vulkaantop gaat de onverharde weg plotseling over in asfalt. 'Dust free zone', staat op borden langs de weg. Rondvliegend stof en de gevoeligste telescopen ter wereld: ze gaan niet samen. Hetzelfde geldt voor strooilicht en telescopen. Nu we omhoog rijden mogen de koplampen van de auto ontstoken zijn, maar gaan we later vannacht naar beneden, dan blijven ze de eerste paar honderd meter gedoofd. Zó lichtgevoelig zijn de grote telescoopspiegels.

Op de top van Mauna Kea is het rond het vriespunt. Buiten, maar ook binnen, in de dienstgebouwen van de IRTF-telescoop. Wie hier werkt draagt een dikke trui of een jas, drinkt veel om uitdroging te voorkomen en doet zo nu en dan een greep uit de voorraad chocolade, noten, instantnoedels en 'midnight nacho's', die de lange nachten op grote hoogte draaglijk moeten maken.

Terwijl operator Brian McOuat de telescoop klaarmaakt voor gebruik en in de koepel een kijkgleuf maakt, nestelen promovendi Lee en Zhang zich achter grote computerschermen in de controlekamer. Om de schouder dragen ze een mobiel zuurstofapparaat dat via een slangetje pufjes lucht naar hun neus duwt.

Lee ervoer al eens hoezeer de ijle lucht op deze hoogte haar werk kan beïnvloeden als ze onvoldoende geacclimatiseerd is: 'Ik werkte op Mauna Kea zonder zuurstof met de 2,2-meter-telescoop van de University of Hawai'i. Ik deed drie keer dezelfde waarneming, die ik ook drie keer in het logboek noteerde. Het duurde even voor ik doorhad dat mijn verstandelijke vermogens achteruit waren gegaan.'

Als astronomen verantwoordelijk voor de golffrontsensor en regelelektronica zullen Zhang en Lee vannacht proberen de diffractielimiet van de telescoop te bereiken. Dit is de theoretische grens waarop twee objecten nog van elkaar te onderscheiden zijn. 'De uitlijning van alle optische instrumenten is de grootste uitdaging,' zegt Zhang. 'Als je valse signalen in

de golffrontsensor krijgt, ga je daarvoor corrigeren. Zo brengt de kleinste afwijking je niet dichterbij je doel, maar er juist verder vanaf.'

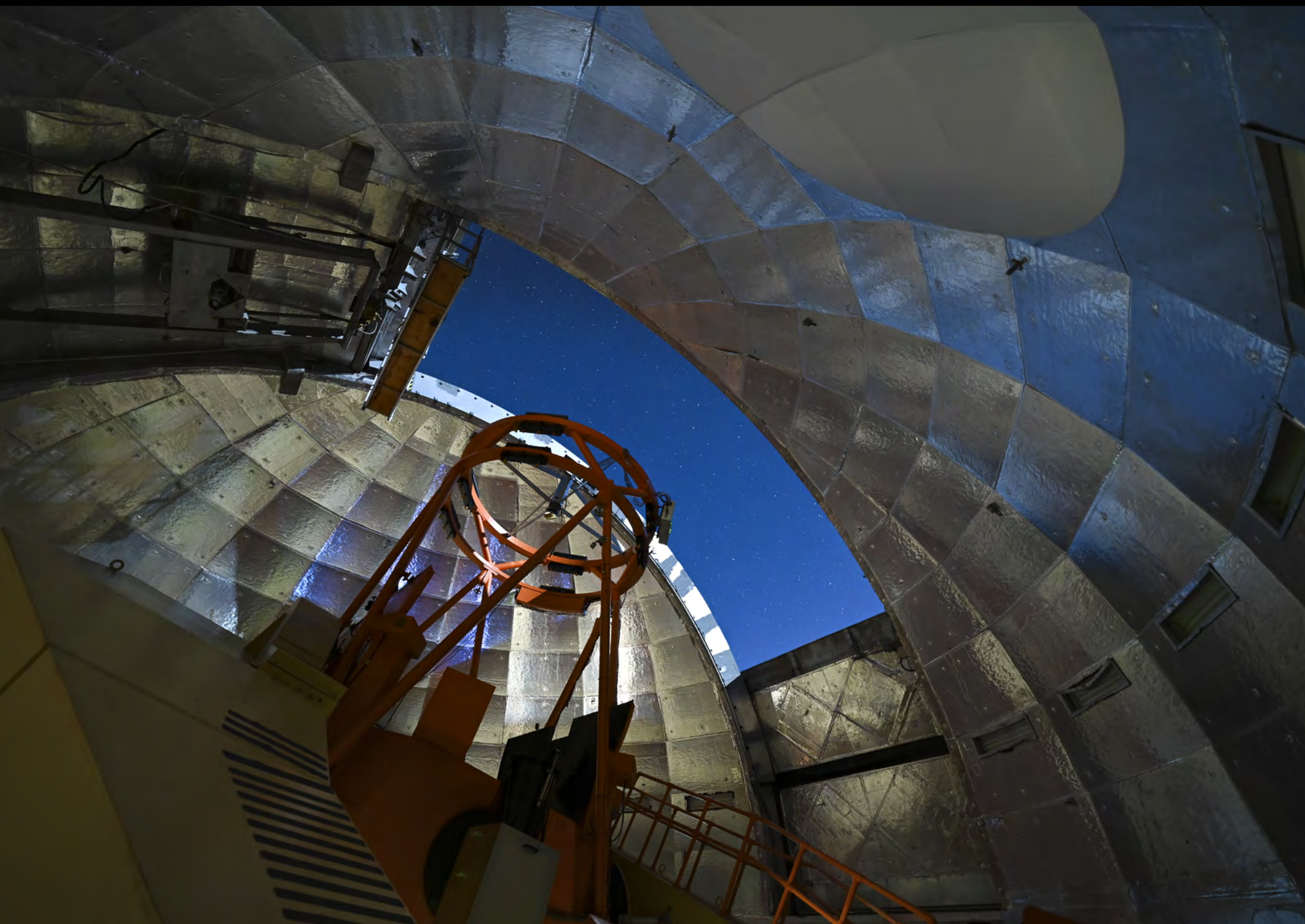
EEN SCHERPE GEEST

EN GEDULD hebben de astronomen nodig. Veel geduld. Met een spiraalbeweging, van een grote cirkel naar een steeds kleinere, zoeken ze ruim anderhalf uur in het oneindige heelal naar één heldere ster om de adaptieve spiegel te kunnen testen. Tevergeefs. Ze doen aanpassingen in de golffrontsensor en daarna in de software die het systeem aanstuurt. Tot ze, net voor middernacht, het eerste licht zien: een wazig lichtvlekje op een groot, zwart scherm.

Daarna sporen ze ook andere sterren op. Een ervan is Arcturus, of *Hōkūle'a*, de ster van vreugde. Eeuwenlang gebruikten Polynesiërs de ster voor navigatie op zee. Met dubbelwandige kano's voeren ze van Tahiti en de Marquesaseilanden naar het noorden, tot ze *Hōkūle'a* recht boven zich aan de hemel zagen staan. Daarna koersten ze westwaarts met de passaatwinden mee, waarna ze strandden op de zuidoostkust van het eiland Hawaï.

Rond drie uur 's nachts is de ster van vreugde het helderste object aan de hemel. Bijna 37 jaar lang reisde het sterrenlicht ongehinderd ruim 348 miljoen kilometer door het heelal naar de aarde. Tot het in de laatste fractie van een seconde onze dampkring tegenkwam. Nu fonkelt Arcturus aan de nachtelijke hemel en 'danst' zijn licht op de telescoopspiegel.

Wat volgt, legt Chun uit, is een wedstrijdje tussen wetenschappers en technici aan de ene kant en de dampkring aan de andere. Zo lang het sterrenlicht wiebelt en springt in een raster van twaalf bij twaalf vakjes op het computerscherm, is de dampkring aan de winnende hand. Als het lukt om het licht met de juiste instellingen en algoritmes te temmen, om de secundaire spiegel precies zo te laten trillen dat in het midden van elk vakje



Beschermd door een zilverkleurige koepel, tuurt de IRTF-telescoop naar objecten in het heelal. NASA gebruikt veel van de waarneemtijd om te zoeken naar planetoïden en kometen die een bedreiging kunnen vormen voor het leven op aarde. Met de adaptieve secundaire spiegel wordt het makkelijker om deze objecten op te sporen en om een beeld te krijgen van hun afmetingen en samenstelling.



een lichtpuntje staat, dan is de 'lus gesloten' en wint de technologie. Op dat moment corrigeren 36 actuatoren live de beweging van de lucht en lijkt de dampkring op magische wijze verdwenen. Om halfvijf's ochtends, na bijna twintig uur installeren, kalibreren en waarnemen, verstuurt Chun een e-mail aan alle betrokkenen met een haarscherpe foto van Arcturus en twee woorden: 'Got it!'

NA DRIE LANGE

NACHTEN TESTEN zit Chun met zijn team aan een late lunch in basiskamp Hale Pōhaku. Ze zijn zichtbaar vermoeid, maar ook tevreden, omdat de spiegel zich gedraagt zoals verwacht. 'Op het meest basale niveau

Operator Brian McQuat, geboren op Hawaï, richt de IRTF-telescoop op de objecten die astronomen willen onderzoeken. Hij vindt het spijtig dat steeds meer telescopen op afstand worden bediend: 'Het is een voorrecht om vanaf Mauna Kea te mogen bijdragen aan de wetenschap.'

hebben we laten zien dat de spiegel werkt,' vertelt Chun. 'Tegelijk is dit pas het begin. De komende maanden gaan we deze technologie tot het uiterste testen. Als de spiegel faalt, waarom faalt hij dan? En hoe kunnen we de volgende spiegel verbeteren met wat we daarvan leren?'

De volgende spiegel is al bijna klaar. Hij is met 62 centimeter bijna drie keer zo groot als de spiegel voor IRTF, bevat 210 actuatoren en wordt in de zomer van 2025 geïnstalleerd op de 2,2-metertelescoop van de University of Hawai'i.

Inmiddels tonen ook andere observatoria interesse in de technologie van TNO. Zoals de Gemini-telescoop en de Automated Planet Finder in Californië, de eerste telescoop ter wereld die volledig automatisch zoekt naar rotsachtige planeten buiten ons zonnestelsel. En hoewel een definitieve beslissing nog moet vallen, is ook het bestuur van de Keck-telescopen zeer geïnteresseerd. Als Keck de hightech spiegels daadwerkelijk bestelt, zullen Nederlandse bedrijven de productie op zich nemen, zodat onderzoeksinstituut TNO zich kan richten op een volgende technologische uitdaging die onderzoek en ontwikkeling behoeft.

Voorzichtig dromen Jonker, Kuiper en hun collega's ervan om niet alleen secundaire, maar ook de vele malen grotere primaire telescopspiegels adaptief te maken. Het liefst die van de volgende generatie supertelescoop, die zelfs de oudste sterren en de dampkring van individuele exoplaneten moet kunnen waarnemen.

'Als instrumentbouwers willen wij maar één ding: astronomen voorzien van de allerbeste apparatuur,' zegt Jonker. 'Zo kunnen ook zij doen waar ze goed in zijn: de grootste mysteries van het heelal ontrafelen.' □

Sander Koenen is wetenschapsjournalist en schrijft geregeld voor National Geographic. Dit is de eerste bijdrage van fotograaf **Fred Kamphues** voor het Magazine. Hij bereidde zich voor op de reportage op Mauna Kea, 4200 meter boven zeeniveau, met lange bergwandelingen ten noorden van Los Angeles.