

De James Webb-ruimtetelescoop

De Hubble Space Telescope (HST) is de beroemdste astronomische satelliet. Sinds de lancering in april 1990 heeft deze telescoop gedurende 25 jaar fantastische ontdekkingen mogelijk gemaakt, variërend van de eerste beelden van accretieschijven rond jonge sterren tot de nauwkeurigste bepaling van de expansiesnelheid van het heelal. Maar de Hubble-telescoop wordt oud en onderdelen kunnen niet meer worden vervangen sinds het shuttleprogramma door NASA is stopgezet. Daarom wordt Hubble binnenkort vervangen door de James Webb-ruimtetelescoop, die eind 2018 zal worden gelanceerd. Bernhard Brandl en Ewine van Dishoeck

82

De James Webb-ruimtetelescoop (JWST) is genoemd naar NASA's tweede baas, James E. Webb, die het agentschap van februari 1961 tot oktober 1968 leidde tijdens het Apolloprogramma. Met een 6,5 m telescoop, geavanceerde technologie en een superieure baan in de ruimte zal JWST de Hubble ver overtreffen, zowel in gevoeligheid als in spatiale resolutie. Verder zal JWST voornamelijk bij infraroodgolflengten waarnemen, tot 28 μm , waar de extinctie van stof veel minder is dan voor zichtbaar licht. JWST kan ook zwakke koude objecten beter waarnemen en bronnen op grote afstand waarvan

de signalen zijn roodverschoven naar lange golflengten.

JWST is een internationale samenwerking tussen NASA (Verenigde Staten), ESA (Europa) en de Canadese ruimtevaartorganisatie CSA. ESA heeft een aantal belangrijke taken: het zal JWST lanceren op een Ariane 5-raket en levert (delen van) twee van de vier wetenschappelijke instrumenten. ESA heeft de leiding bij het nabij-infrarood spectroscopische instrument NIRSPEC en is verantwoordelijk voor de optiek van het mid-infraroodinstrument MIRI, waarbij Nederlandse astronomen en technici een grote rol speelden in het definiëren, ontwerpen en bouwen van deze instrumenten.

Voor deze bijdragen krijgen Europese astronomen volledige toegang tot JWST, met ten minste 15% van de totale waarnemings-tijd. Net als voor Hubble zal het Space Telescope Science Institute (STScI) in Baltimore (Verenigde Staten) de leiding hebben bij de wetenschappelijke exploitatie van JWST.

Waarom een grotere telescoop?

De grootte van de telescoop

heeft twee fundamentele effecten. Ten eerste bepaalt de diameter D van de spiegel de scherpte waarmee een object kan worden waargenomen. Volgens het criterium van Rayleigh wordt het ruimtelijk oplossend vermogen gegeven door $\theta_{\text{rad}} = 1,22 \cdot \lambda / D$. Bij een golflengte van 1 μm , geeft de 6,5 m JWST-spiegel een resolutie van 0,04 boogseconde, hetgeen correspondeert met de dikte van een haar gezien van een afstand van 10 m.

Ten tweede vangt een grotere spiegel meer fotonen. Voor puntbronnen zoals sterren op grote afstand wordt hun beeldgrootte bepaald door de diameter van de telescoop. De sterkte van de

Bernhard Brandl is hoogleraar infrarood-astronomie aan de Universiteit Leiden. Hij onderzoekt reusachtige stervorming en infraroodstralende melkwegstelsels.

Daarnaast werkt hij aan astronomische instrumentatie. Hij is PI van het METIS-instrument voor E-ELT en deputy co-PI van het JWST-MIRI-instrument sinds 2004.

brandl@strw.leidenuniv.nl



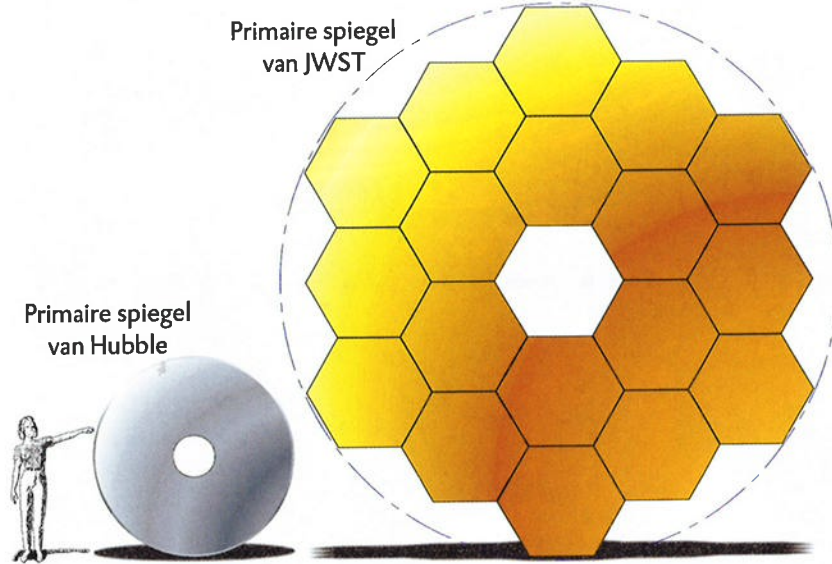
Ewine van Dishoeck is hoogleraar moleculaire astrofysica aan de Universiteit Leiden. Zij onderzoekt de natuur- en scheikunde van sterren planeetvorming.

Ze maakte deel uit van de wetenschappelijke adviescommissies van JWST in de periode 1997-2001 en is co-PI van het JWST-MIRI-instrument sinds 2002.

ewine@strw.leidenuniv.nl



uniforme achtergrondruis is echter onafhankelijk van de telescoop. De signaal-ruisverhouding, die de detectiemogelijkheid van een zwakke bron bepaalt, schaalt dus met het kwadraat van de spiegel diameter D^2 . Dit betekent dat de benodigde waarnemingsduur om een bepaalde puntbron te detecteren te halen schaalt als D^4 . Met andere woorden: JWST haalt dezelfde gevoeligheid als HST 45 keer sneller. Wat nu minder dan een nacht zal duren met JWST, zou een maand duren met HST in het nabij-infrarood. In het mid-infrarood is de winst ten opzichte van eerdere missies nog groter dankzij enorme vooruitgang in detector-technologie, zowel qua gevoeligheid als in de grootte van de detectorarrays. Wat met de JWST in een seconde gedaan kan worden, zou een miljoen jaar met de Infrared Astronomical Satellite (IRAS) in 1983 hebben geduurd. Een 6,5 m telescoop past echter niet in een bestaande raket. De enige manier om JWST naar zijn baan te lanceren is om zowel de primaire als secundaire spiegel en hun draagstructuur op te vouwen, net als een vlinder in zijn cocoon. De JWST-spiegel bestaat daarom uit achttien hexagonale segmenten die alles bij elkaar een oppervlakte hebben van 25 m² (figuur 1).



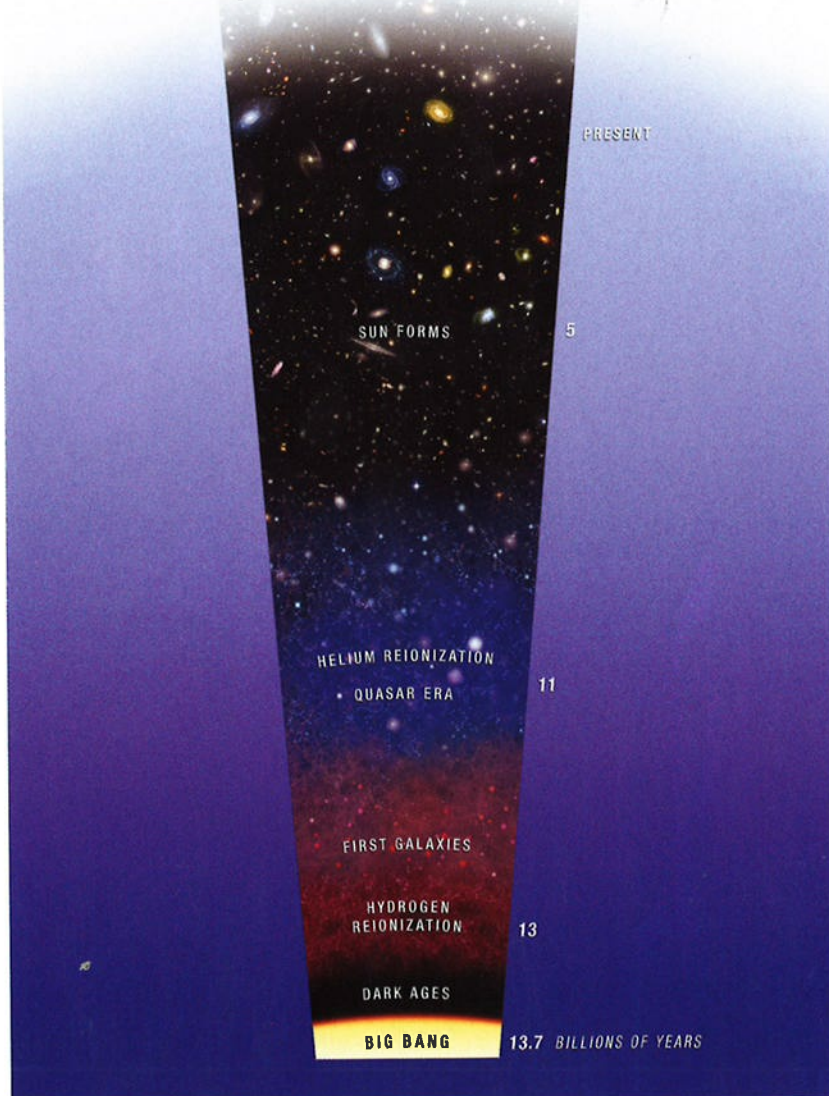
Figuur 1 Vergelijking tussen de spiegels en configuratie van de Hubble-ruimtetelescoop (links) en de James Webb-ruimtetelescoop (rechts). Bron: NASA.

Astronomie met JWST

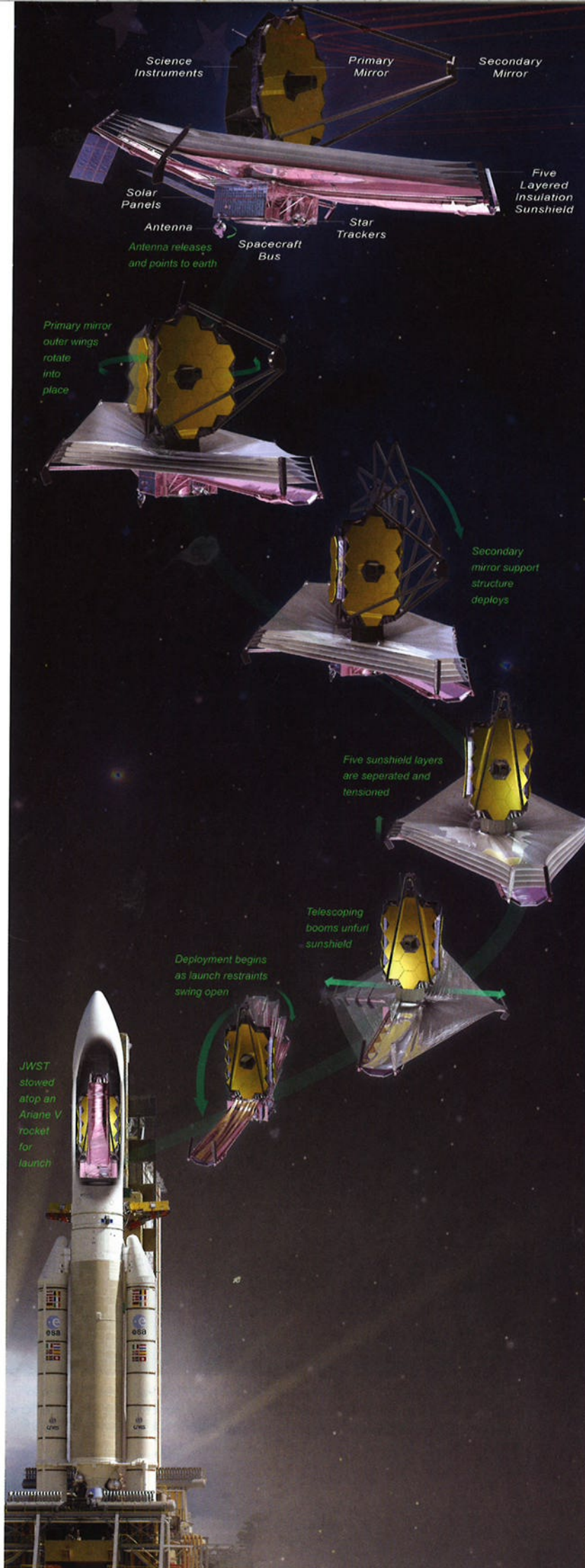
Net als de Hubble is JWST ontworpen als een observatorium dat veel verschillende astronomische vragen kan bestuderen en een grote astronomische gemeenschap kan bedienen. De voornaamste wetenschappelijke doelen kunnen in vier thema's worden ondergebracht:

1. Het detecteren en bestuderen van de eerste sterren, sterrenstelsels, supernovae en zwarte gaten in het heelal. Dit wordt ook wel het 'eerste licht' na de oerknal genoemd.
2. Het bouwen van sterrenstelsels: hoe zijn sterrenstelsels gevormd, hoe hebben ze zich ontwikkeld van de eerste protostelsels tot de huidige spiraalstelsels en wat was de rol van zwarte gaten en stervorming tijdens dit proces.
3. Vorming en evolutie van sterren en planetenstelsels in interstellaire wolken en van de chemische samenstelling van het materiaal.
4. Het vinden en in kaart brengen van exoplaneten en het bestuderen van het koude buitendeel van ons eigen

History of the Universe



Figuur 2 Tijdspad van het heelal, van beneden naar boven. JWST kan verder terugkijken in het vroege heelal dan Hubble, tot aan het reïonisatietijdperk toen de eerste heldere objecten (sterren en sterrenstelsels) zijn gevormd. BRon: NASA, ESA en A. Feild (STScI).



zonnestelsel. Met andere woorden, het onderzoeken van de omstandigheden voor de oorsprong van leven in het heelal.

We gaan hier enkel verder in op het eerste thema.

Na de oerknal, 13,8 miljard jaar geleden, was het heelal een heet plasma van protonen, neutronen en elektronen, waaruit uiteindelijk de eerste waterstof- en heliumionen zijn gevormd. Fotonen konden worden verstrooid aan de vrije elektronen. Nadat het heelal echter verder was uitgedijd en afgekoeld, werden de elektronen ingevangen door de ionen en werden de eerste neutrale atomen gevormd. De achtergrondstraling van de oerknal werd steeds zwakker en het heelal werd vrijwel helemaal donker (zie figuur 2). Daarna groeiden de eerste structuren en werden ze steeds complexer zodat de zwaartekracht een rol begon te spelen: de eerste sterren konden door ineenstorting worden gevormd en hun ultraviolette straling kon de omgeving weer ioniseren: het tijdperk van de reïonisatie was begonnen. Rond die tijd, zo'n 500 miljoen jaar na de oerknal, begonnen ook de eerste sterrenstelsels te vormen, in structuren bepaald door de verdeling van de donkere materie.

De voornaamste wetenschappelijke drijfveer voor JWST is om de eerste bronnen in het reïonisatietijdperk te vinden en om de vorming en evolutie van de eerste sterrenstelsels waar te nemen. JWST zal waarschijnlijk een flink deel van zijn tijd besteden aan het waarnemen van de zwakste objecten aan de rand van het heelal. Door de uitdijing van het heelal is de straling van deze bronnen roodverschoven met een factor tien, dat wil zeggen dat licht met een golflengte λ_0 dat in dit tijdperk werd uitgezonden, wordt waargenomen bij een golflengte $\lambda = \lambda_0 \cdot (1+z)$, waarbij z de roodverschuiving is. Dus, zelfs de Lyman- α -lijn schuift naar het infrarood naar $1,34 \mu\text{m}$ bij $z=10$ en de Balmer- α -lijn naar $7,21 \mu\text{m}$! Dit is een van de redenen waarom de JWST-instrumenten voornamelijk bij infraroodgolflengten werken.

Figuur 3 De lancering en het uitvouwen van de James Webb-ruimtetelescoop (rechts). Credit: Northrop Grumman - NASA.

JWST-lancering

De baan van de JWST ligt op 1,5 miljoen kilometer van de aarde, veel verder weg dan de Hubble die op een hoogte van slechts 570 kilometer in 96 minuten rond de aarde cirkelt. Ter vergelijking: de afstand van zon naar aarde is 150 miljoen kilometer en de maan cirkelt rond de aarde op een afstand van 384.500 kilometer. JWST gaat naar het zogenaamde Lagrange-punt L₂, wat ook de locatie is van eerdere ESA-missies zoals Herschel, Planck en Gaia. Het L₂-punt ligt op de lijn die de zon en aarde verbindt en waar hun gravitatievelden de centrifugale effecten op JWST compenseren. Een satelliet op die afstand heeft weinig energie (brandstof) nodig om zijn baan te behouden, heeft weinig last van de thermische straling van de aarde en de maan, kan een groot deel van de hemel zien en is altijd op dezelfde plaats gezien vanaf aarde, wat de communicatie makkelijk maakt.

Met een massa van 6500 kg is JWST aanzienlijk lichter dan de Hubble (11.110 kg), dankzij ultralichte spiegels gemaakt van borium en nieuwe technologieën. ESA heeft in december 2015 het contract getekend met Arianespace om JWST in oktober 2018 te lanceren vanaf Kourou. De Ariane 5-raket brandt maar acht minuten en JWST zal na een half uur worden afgestoten. Snel daarna worden de zonnepanelen en de hoofdan-tenne uitgevouwen. De eerste week is het meest kritiek: het uitvouwen van de telescoop en het zonnescild (figuur 3). Na een maand is de telescoop voldoende afgekoeld zodat de



Figuur 4 Een testversie van het JWST-zonnescild met vijf lagen folie, opgebouwd in een cleanroom bij Northrop Grumman in Redondo Beach, California. Foto: NASA/Chris Gunn.

eerste instrumenten kunnen worden aangezet. Na drie maanden is JWST in zijn L₂-baan en kunnen de eerste wetenschappelijke beelden worden genomen.

JWST-technologie

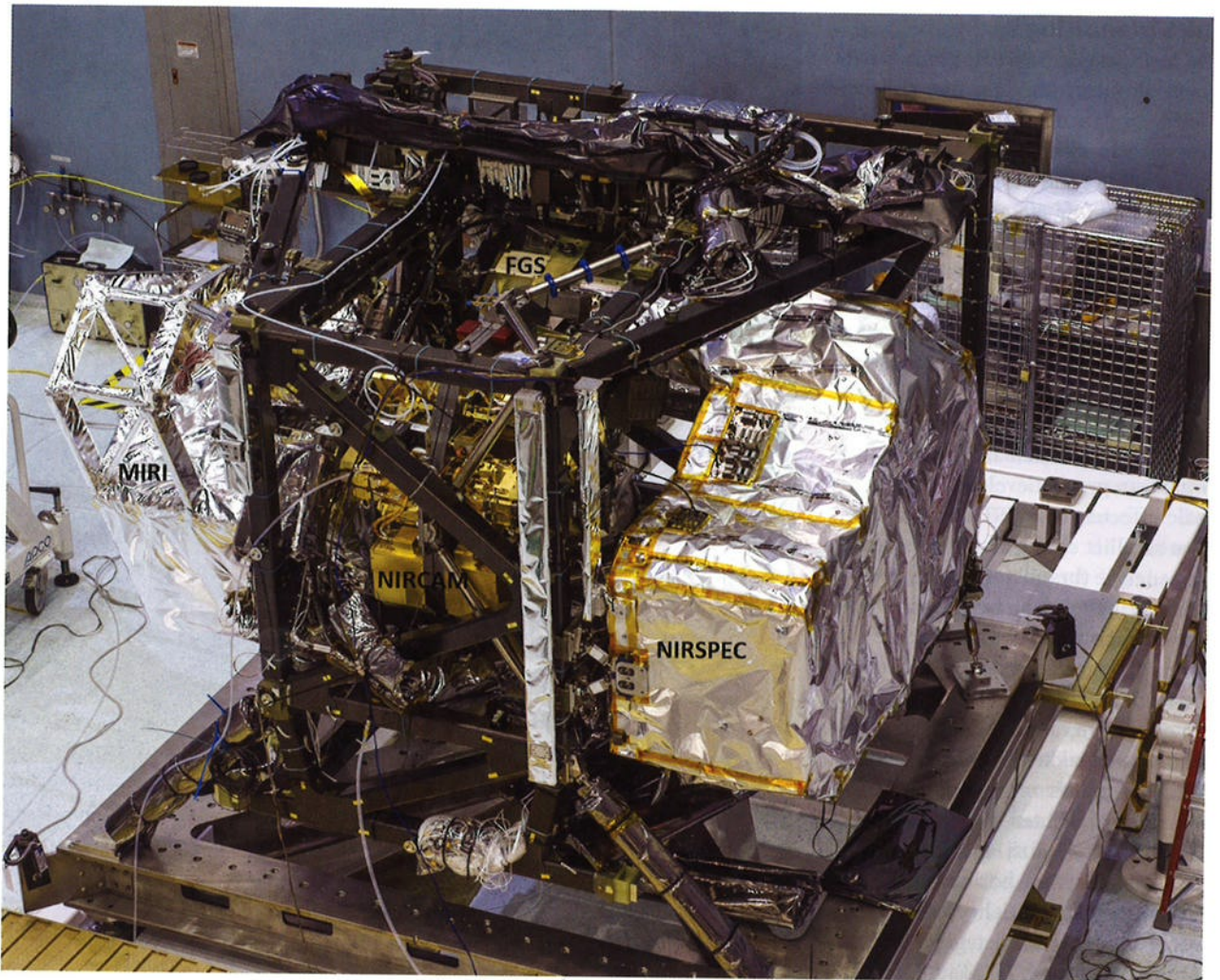
Een van de uitdagingen van de JWST-missie is om de telescoop af te koelen tot een temperatuur onder de 50 K, zodat de thermische straling van de telescoop zelf minimaal is. Warme onderdelen van de telescoop kunnen makkelijk de achtergrondstraling van de hemel overheersen en daarmee de gevoeligheid bij infrarode golflengten beperken. De passieve koeling wordt door een zonnescild verzorgd, dat bestaat uit vijf lagen dunne folie en die samen de 300 kW die JWST ontvangt

van de zon reduceert tot 23 mW aan de achterkant. Dit is voldoende om een temperatuurverschil van 300 K tussen de voor- en achterkant te bewerkstelligen. Aangezien JWST groot is, moet het zonnescild nog groter zijn: met 22 m bij 12 m is het vergelijkbaar met een tennisveld (figuur 4). De passieve koeling is genoeg voor de telescoop en de drie instrumenten die in het nabije infrarood werken, rond de 39 K. Het mid-infraroodinstrument MIRI werkt echter bij een temperatuur van 7 K, waarvoor een actieve cryokoeler nodig is.

Er waren nog meer technologieontwikkelingen nodig voor JWST: een microshutter voor multi-objectspectroscopie, lichtgewicht cryogene spiegels, speciale golffrontsensoren en

Instrument	Mode	Wavelength (μm)	Spectral Resolution ($\lambda / \Delta\lambda$)	Field of View
NIRCam	shortwave	0,6 - 2,3	4, 10, 100	2,2' x 2,2'
	longwave	2,4 - 5,0	4, 10, 100, 200	2,2' x 2,2'
NIRSpec	multi-object	1,0 - 5,0	1000	0,20" x 0,46" shutters within 9,7 sq arcmin
	multi-object	0,6 - 5,0	100	
	long slit	1,0 - 5,0	100, 1000, 2700	0,4" x 4", 1,6" x 1,6"
	integral field	0,7 - 5,0	2700	3" x 3"
MIRI	imager	5 - 27	5	1,9' x 1,4'
	low res slit	5 - 11	100	5" x 0,6'
	integral field	4,67 - 28,82	~3000	3,7" x 3,7" - 7,1" x 7,1"
NIRISS	imager	0,8 - 5,0	4, 10	2,2' x 2,2'
	wide field slitless	0,8 - 2,25	150	2,2' x 2,2'
	single-object slitless	0,7 - 2,5	700	2,2' x 2,2'
	aperture masking	3,8	10, 20	2,2' x 2,2'

Figuur 5 Technische specificaties van de vier wetenschappelijke instrumenten op JWST.



Figuur 6 De *integrated science instrument module* (ISIM) waarin NIRSPEC (rechts), NIRCAM (centrum) en MIRI (links) zijn gehuisd. De FGS zit aan de linkerkant van NIRCAM en is nauwelijks zichtbaar op deze foto. De ISIM is het wetenschappelijke hart van JWST. Foto: NASA/Chris Gunn.

strategieën voor het uitlijnen van de telescoop, nieuwe infrarode detectoren, cryogene geïntegreerde circuits voor data-acquisitie en een cryogene koeler voor MIRI. Alles bij elkaar ligt het prijskaartje voor de missie nu rond de negen miljard dollar, inclusief de kosten voor het uitgebreide testprogramma, de lancering en vijf jaar wetenschappelijke exploitatie.

De wetenschappelijke instrumenten van JWST

JWST heeft vier wetenschappelijk instrumenten aan boord: MIRI, NIRCAM, NIRSPEC en FGS/NIRISS. MIRI bestaat uit een camera (met een coronograaf) en een *integral field*-spectrometer die beide bij mid-infraroodgolflengten werken (5–28 μm). De andere drie instrumenten werken bij 0,6–5 μm . NIRCAM is een camera met een groot blikveld, die ook gebruikt wordt om de primaire spiegelsegmenten uit te lijnen na de lancering. NIRSPEC is een multi-

object-spectrometer die met behulp van een microshutterarray de spectrometerspleten (*slits*) op willekeurige posities binnen een veld aan de hemel kan richten. NIRSPEC heeft ook een *integral field*-spectrometer. Ten slotte is FGS/NIRISS een camera en spectrometer zonder slits waarbij de *fine guidance sensor* (FGS) ook voor het nauwkeurig volgen van objecten tijdens de waarnemingen zorgt. Figuur 5 geeft een samenvatting van de instrumenten.

De ontwikkeling en bouw van deze vier instrumenten is uitgevoerd door een groot aantal wetenschappelijke en technische instituten in de Verenigde Staten, Europa en Canada. Een mijlpaal werd bereikt in de zomer van 2014 toen alle vier de instrumenten zijn geïnstalleerd in de *integrated science instrument module* (ISIM, figuur 6) bij NASA's Goddard Space Flight Center. In het begin van 2016 wordt de ISIM geïntegreerd met de telescoop op NASA's Johnson Space Center

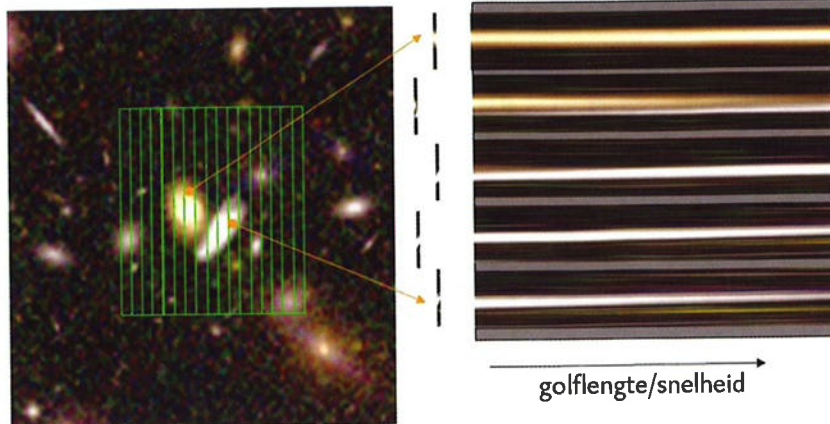
in Houston en wordt het hele optische systeem getest in de historische Chamber A. Deze gekoelde testkamer is met 36,6 m bij 19,8 m verreweg de grootste vacuümkamer op aarde, oorspronkelijk ontwikkeld in 1965 voor het Apolloprogramma. Het is geheel vernieuwd voor het testen van JWST.

Nederlandse deelname in JWST/MIRI

De Nederlandse astronomische gemeenschap heeft onder leiding van het Netherlands Institute for Space Research (SRON) een lange en succesvolle staat van dienst in het pionieren van grote infraroodruimtetlescopen, beginnend met de Infrared Astronomical Satellite (IRAS, 1983), de Infrared Space Observatory (ISO, 1995) en meest recent de Herschel Space Observatory (2009), waarvoor SRON het heterodyne instrument HIFI heeft gebouwd. De nauwe betrokkenheid over de laatste dertig jaar heeft geleid tot een grote gemeenschap van expert-

astronomen. JWST is de logische volgende reuzenstap in dit onderzoek. Sinds eind jaren 1990 zijn Nederlandse astronomen intensief betrokken bij de definitie en optimalisatie van de specificaties voor de wetenschappelijke instrumenten. In het bijzonder is Marijn Franx (Sterrewacht Leiden) lid van het wetenschappelijke team van NIRSPEC en is Ewine van Dishoeck de Nederlandse co-PI voor MIRI en mede verantwoordelijk voor het feit dat JWST een mid-infraroodinstrument aan boord heeft, inclusief een spectrometer. Beide auteurs van dit artikel hebben bijgedragen aan het ontwerp en de bouw van het MIRI-instrument. MIRI bestaat uit twee modules: (i) een camera met filters en een coronograaf om naar exoplaneten te zoeken; ook is er de optie om zeer gevoelige lage-resolutiespectra te nemen ($R \sim 100$); (ii) een *integral field*-spectrometer ($R \sim 1500$ tot 3500) waarmee spectra op meerdere plaatsen aan de hemel gelijktijdig kunnen worden genomen. Figuur 7 toont het principe van deze spectrometer.

Nederland heeft de main optics van deze spectrometer ontworpen, ge-



Figuur 7 Principe van de *integral field*-spectrometer van MIRI. Het gezichtsveld is $7,7 \times 7,7$ boogseconde² bij de langste golflengten. Credit: A. Glasse.

bouwd, getest en geleverd. De module is uit een blok aluminium van 200 kilo gesneden, waarvan uiteindelijk een 1,5 kg lichtgewicht draagstructuur is overgebleven. Het meeste werk is gedaan door de technische experts van de Nederlandse Onderzoekschool voor de Astronomie (NOVA), de optisch/infrarood-groep in Dwingeloo, met input van TNO. Het project is financieel ondersteund door NWO en NOVA. Voor deze investeringen krijgen Nederlandse astronomen een deel

van de gegarandeerde waarneemtijd, zodat ze als eersten wetenschappelijk kunnen oogsten met dit revolutionaire instrument.

MIRI is gebouwd door een internationaal consortium van Europese en Amerikaanse instituten en was het eerste instrument dat bij JWST in mei 2012 is afgeleverd. Na bijna twintig jaar werk wacht het Nederlandse MIRI-team samen met astronomische collega's over de hele wereld vol spanning op de lancering in 2018!

Nieuws

Prijsvraag Teylers Stichting

De Teylers Stichting, die gelieerd is met het bekende Teylers Museum in Haarlem waar Lorentz curator was vanaf 1909, kent twee genootschappen die onder andere prijsvragen uitschrijven. Dit jaar is een prijsvraag uitgeschreven naar "schoolvorming in de natuurwetenschappen, met aandacht voor bijvoorbeeld het historisch perspectief of de vraag in hoeverre schoolvorming onder invloed van moderne communicatiemiddelen en met name internet zal veranderen". Inzendingen voor de prijsvraag dienen uiterlijk 1 januari 2017 te worden ingestuurd. De inzending kan bestaan uit een essay of een bundeling van publicaties voorzien van een uitgebreide inleiding, waarin een licht wordt geworpen op een van de vele soorten van schoolvorming in de natuurwetenschappen. Hierbij kan ge-

dacht worden aan schoolvorming in de vorm van een leermeester die een voorbeeldfunctie heeft, maar ook aan geopolitieke schoolvorming, schoolvorming door een experimentele voorsprong (denk aan Kamerlingh Onnes!), schoolvorming op een groot (industriële) lab (Bell Labs!), en voor het feit dat schoolvorming zowel positieve als negatieve kanten kan hebben. De prijs bestaat uit een erepenning die wordt uitgereikt in het Teylers Museum in aanwezigheid van de pers en genodigden. Zie voor meer informatie de website van de genootschappen (google op 'Teylers genootschappen').

Wim van Saarloos