

Planeetatmosferen onder de loep

Spectroscopie maakt het mogelijk om de interactie van materie met elektromagnetische straling, in het bijzonder met licht, te bestuderen. In de astronomie en het ruimteonderzoek is dit een uitermate krachtig hulpmiddel. Analyse van bijvoorbeeld de samenstelling van het oppervlak en de atmosfeer van planeten is daardoor mogelijk. De ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) missie van ESA en ROSCOSMOS (de Europese en Russische ruimtevaartagentschappen) heeft haar eerste waarnemingen van de planeet Mars uitgevoerd. Aan boord bevinden zich twee instrumenten met in totaal zes spectrometers, die in het ultraviolet, zichtbaar en infrarood licht meten. Deze eerste waarnemingen bevestigen dat de instrumenten uitstekend werken. Bovendien zal de James Webb Space Telescope, de opvolger van de Hubble-ruimtetelescoop, meerdere instrumenten aan boord hebben voor het bestuderen van de planeten in ons Zonnestelsel.

Door Ann C. Vandaele, Arianna Piccialli en Séverine Robert
(koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie, Ukkel)

In de astronomie en het ruimteonderzoek is spectroscopie een onmisbaar hulpmiddel.

Het NOMAD-instrument aan boord van de Mars Trace Gas Orbiter gebruikt verschillende waarneemperspectieven om de samenstelling van de Marsatmosfeer te bepalen.

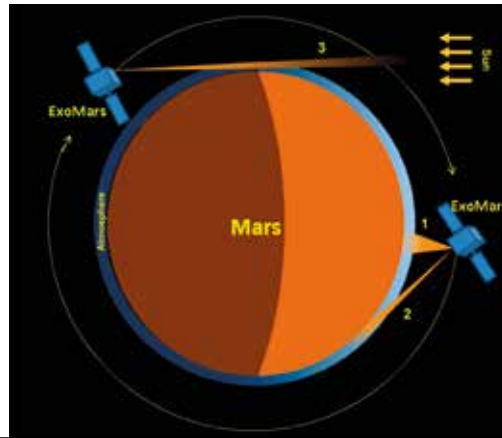
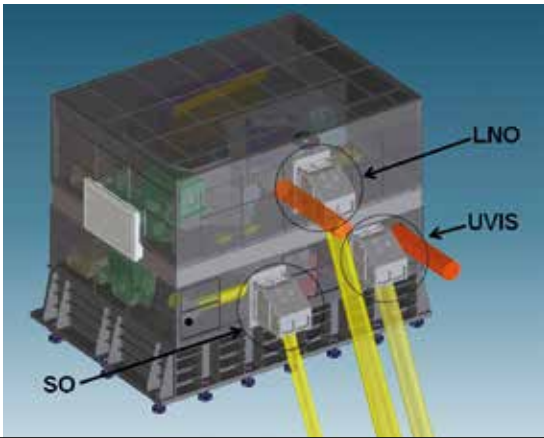
Planeetonderzoek vanaf de aarde kent zo zijn eigen uitdagingen.

ExoMars bestaat uit twee missies. De Trace Gas Orbiter (TGO) kwam samen met de Schiaparelli-lander in oktober 2016 aan bij Mars en begon vervolgens aan een reeks manoeuvres om, gebruikmakend van de remmende werking van de hoogste lagen van de Marsatmosfeer, in zijn definitieve baan terecht te komen. Momenteel volgt de Orbiter een vrijwel cirkelvormige baan op een hoogte van 400 km rond de planeet, met een inclinatie (helling ten opzichte van het evenaarsvlak) van 74 graden. Helaas mislukte de landing van Schiaparelli. In 2020 is de lancering van de ExoMars-rover voorzien. Deze kan enkele kilometers over het Marsoppervlak afleggen, de bodem en de atmosfeer analyseren, en kan zelfs tot twee meter onder het oppervlak boren om te zoeken naar mogelijke sporen van leven.

NOMAD

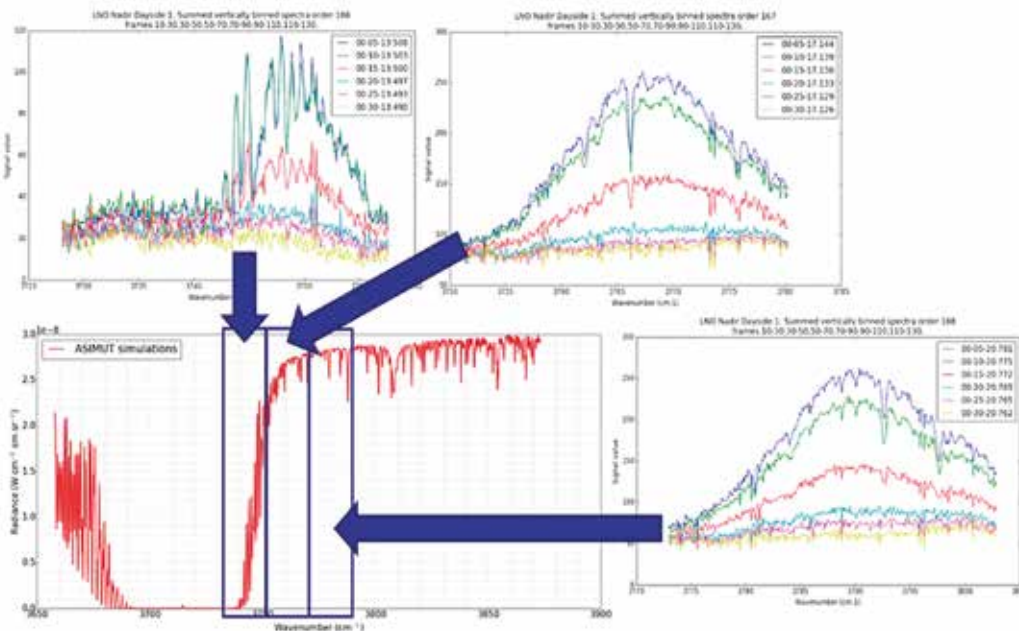
TGO heeft vier instrumenten aan boord: de hoge resolutie-camera CASSIS, de neutrondetector FREND en twee spectroscopen ACS en NOMAD (Nadir and Occultation for Mars Discovery). Deze laatste (Figuur 1) is in België ontwikkeld en bestaat uit drie spectrometers: SO en LNO die in het infrarood werken (2.3-4.0 μm), en UVIS die in het ultraviolet en zichtbaar spectrum werkt (200 tot 650 nm).

Vanuit zijn baan rond de planeet kan TGO meerdere typen waarnemingen uitvoeren: waarnemingen in de richting van het nadir (loodrecht naar het oppervlak gericht), limbmetingen (naar de horizon van de planeet gericht) en in zonneocculatie (naar de zon gericht, Figuur 2). Met het nadirperspectief is het mogelijk om de planeet in kaart te brengen in een tijdspanne van enkele dagen, zeven in het geval van TGO. Nadirmetingen geven enkel informatie over de totale hoeveelheid aanwezige chemische stoffen in de kijkrichting en laten bijna niet toe om de verticale verdeling in de atmosfeer te karakteriseren. Dat kan wel via de limb- en zonneocculatiewaarnemingen. Het SO-kanaal van NOMAD kan bijvoorbeeld een spectrum meten van elke kilometer in verticale richting, waardoor het mogelijk wordt om verticale profielen van de verschillende moleculen (de verticale verdeling in de Marsatmosfeer) met hoge resolutie te bepalen, te meer omdat deze methode zeer gevoelig is. Voor deze SO-metingen kijkt het instrument door de atmosfeer direct naar de zon die een zeer intense lichtbron is. Het UVIS-kanaal is gevoelig in het ultraviolet en zichtbare spectrum, wat het in staat stelt om waarnemingen van ozon en stofwolken te verrichten. De wetenschappelijke fase van de



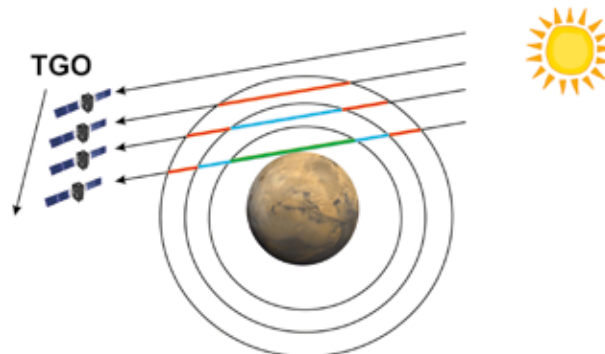
Figuur 2. Verschillende waarneemperspectieven. (1) nadir: het instrument is loodrecht naar het oppervlak van de planeet gericht, (2) limb: het instrument is naar de horizon van de planeet gericht, en (3) zonneoccultatie: het instrument is direct naar de zon gericht.

Figuur 1. Het NOMAD-instrument bestaat uit drie onafhankelijke spectrometers: SO (Solar Occultation), LNO (Limb Nadir and Occultation) en UVIS (UV en visueel spectrum).



Figuur 3. Enkele spectra verkregen in het nadirperspectief, met detecties van CO₂ en H₂O. Beneden links (rood) een gesimuleerd spectrum van het signaal dat de detector bereikt wanneer in het nadir wordt gemeten. De drie kaders geven de spectra aan die geregistreerd zijn in naburige golflengtegebieden. Deze 'onbewerkte' spectra zijn nog niet gekalibreerd. Het betreft in feite het aantal gedetecteerde fotonen (lichtdeeltjes), die vervolgens in een hoeveelheid licht moeten worden omgezet. De algemene klok-vorm van de spectra wordt veroorzaakt door diverse instrumentele effecten die nog niet gecorrigeerd zijn (effect van het spectrometernetwerk en van een filter dat voor het instrument geplaatst is, lineariteit van de detector, etc.).

Figuur 4. De zonneoccultatietechniek. Het instrument aan boord van de satelliet is voortdurend naar de zon gericht terwijl het geleidelijk, vanuit de zon gezien, achter Mars verdwijnt. Het spectrum buiten de atmosfeer dient als referentie. De opeenvolgende spectra analyseren telkens een diepere regio van de atmosfeer.

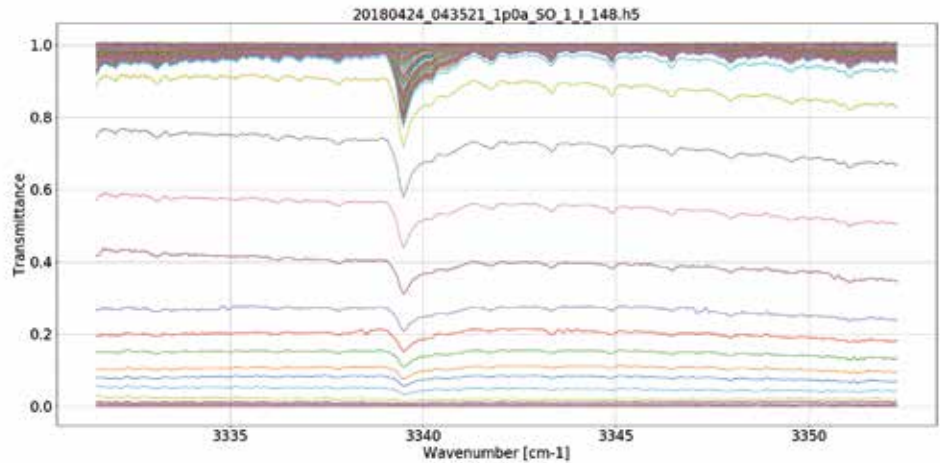


TGO-missie begon officieel op 21 april 2018. Sindsdien heeft NOMAD talrijke spectra geregistreerd en tegelijkertijd de verschillende observatiemodi uitgetest. Tot op heden geven de verzamelde gegevens aan dat het instrument in zeer goede staat verkeert. De spectra duiden op de aanwezigheid van ozon, waterdamp, koolstofmonoxide en -dioxide. Figuur 3 illustreert enkele resultaten verkregen vanuit het nadirperspectief en toont

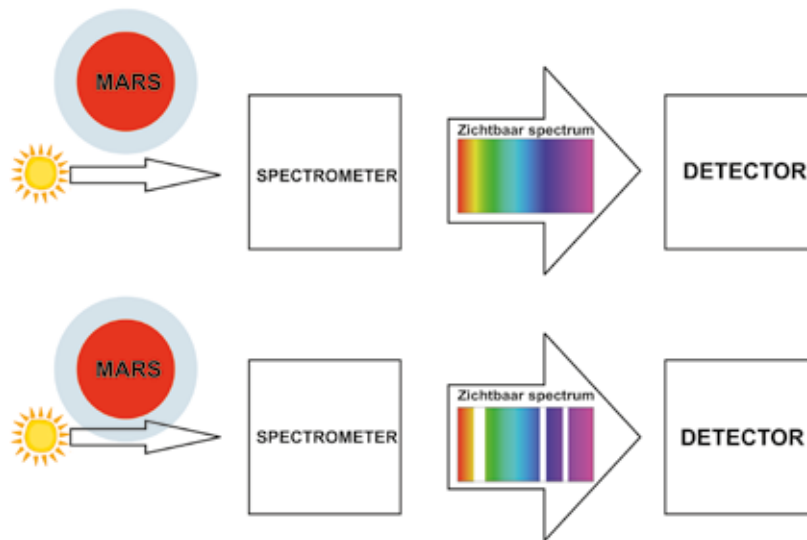
het vermogen van het NOMAD/LNO-instrument om CO₂ en H₂O te detecteren. Verdere analyse is nodig om de aanwezigheid van sporen van nog andere chemische verbindingen in de Marsatmosfeer aan het licht te brengen. Onze wetenschappers werken verder aan nieuwe methodes om verticale profielen van concentraties van verschillende atmosferische bestanddelen te bepalen. Momenteel is er echter nog veel werk aan de winkel

om de kalibratie van de drie kanalen van het instrument te verfijnen. Ook al ging dit al lang voor de lancering van het instrument van start in het laboratorium, het is van cruciaal belang om de kalibratie aan te passen aan de werkelijke omstandigheden in de ruimte waaraan het instrument nu is blootgesteld. De satelliet ondergaat zowel invloeden van de Zon als van Mars. Deze veranderen zijn thermische toestand, wat op zijn beurt weer de

Figuur 6. Spectra verkregen met het NOMAD/SO-instrument in zonneoccultatie op 24 april 2018, in een spectraal gebied gekozen om CO₂ te detecteren. De Marsatmosfeer bestaat voor ongeveer 95% uit kooldioxide.



Figuur 5. Spectroscopisch onderzoek van een planeet atmosfeer. Wanneer de zonnestralen door de atmosfeer gaan (beneden) absorberen de moleculen een deel van de energie. Het resulterende spectrum geeft een vingerafdruk weer van deze absorptie. Bepaalde golflengtes zijn verdwenen in het onderste spectrum vergeleken met het volledige spectrum erboven.



kenmerken van het instrument beïnvloedt. Bovendien moet er een hele reeks testen uitgevoerd worden om de registratie van de gegevens te optimaliseren (integratietijd, aantal geaccumuleerde spectra, beoogde chemische verbindingen en voor elk het optimale spectrale bereik, enz.), dit alles rekening houdend met de beperkingen van de satelliet en van het transmissiesysteem van de gegevens naar de aarde.

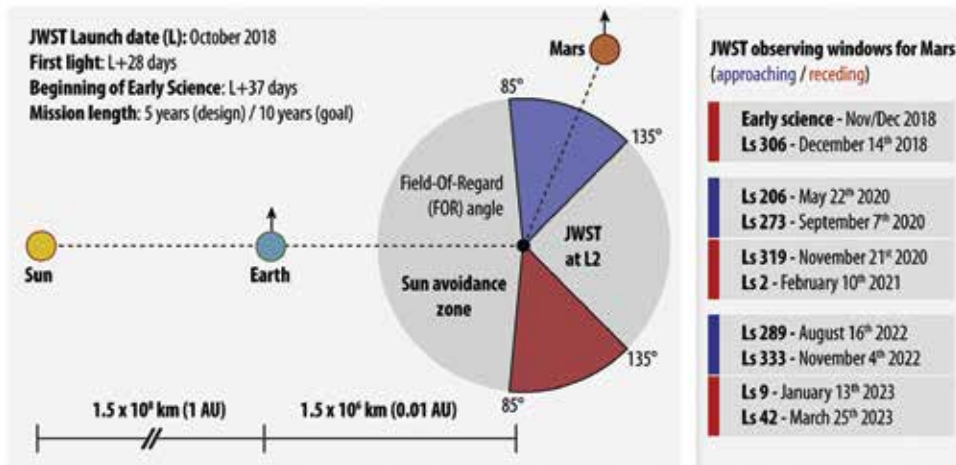
Zonneoccultatie

Bij een waarneming in zonneoccultatie wordt het instrument naar de Zon gericht en registreert het de spectra op regelmatige intervallen gedurende de zonsopgang en -ondergang. Zo kan het instrument de atmosfeer analyseren tot aan het planeetoppervlak (Figuur 4). Figuur 6 toont een voorbeeld van resultaten van een dergelijke observatie. De spectra werden getransformeerd in transmissiespectra door elk spectrum van de atmosfeer te delen door de buiten de atmosfeer verkregen referentie, in feite het spectrum van de zon. Trans-

missies waarvan de resultaten van de delingen bijna 1 zijn, komen overeen met de hoogste lagen waar de atmosfeer erg dun en de absorptie door atmosferische gassen laag is. Daarentegen vermindert het signaal wanneer de geanalyseerde lagen dieper liggen, voornamelijk door de aanwezigheid van stof in de atmosfeer of wolken. Het spectraal gebied in Figuur 7 toont de absorptie van koolstofdioxide. Door de diepte van deze lijnen te analyseren kan men de concentratie langs het optische traject bepalen. Vervolgens kan door toepassing van de zogeheten ‘uienschil’-methode het verticaal profiel van de dichtheid bepaald worden: het spectrum van de buitenste laag van de atmosfeer (in rood in Figuur 4) bevat enkel informatie over de concentratie in deze laag; het volgende spectrum bevat informatie over zowel de tweede laag (blauw) als de laag erboven die geanalyseerd werd tijdens de vorige meting (rood). Zo kunnen we een profiel reconstrueren van de hoogste lagen tot aan het oppervlak van de planeet.

Spoorgassen

Het voornaamste doel van de ExoMars-missie, en vooral NOMAD, is de zoektocht naar spoorgassen die kunnen duiden op huidig of uitgestorven leven op de rode planeet. Een spoorgas betekent dat het gaat om concentraties in ppb of zelfs minder (1 ppb of *part per billion* is gelijk aan één molecule per miljard moleculen lucht). De kern van ons onderzoek bestaat uit verschillende vragen. Allereerst: is er methaan in de Marsatmosfeer? Eerdere metingen vanaf de aarde en door ruimtesondes lijken daarop te wijzen. Methaan op Mars kan een product zijn van serpentinisatie, een proces waarbij ijzerhoudende silicaten, kooldioxide en water onder hoge temperatuur (vulkanische warmte in de ondergrond?) met elkaar reageren. Het meeste methaan in de atmosfeer van de aarde heeft echter een biologische oorsprong. Andere te beantwoorde vragen zijn: Wat vertellen variaties van methaan en andere spoorgassen in de geochemische cyclus ons? Wat is de verdeling van de chemische stoffen in de atmosfeer? Hoe ontstaan en verdwij-



Figuur 7. De James Webb-ruimtetelescoop, in het Lagrangepunt L2 geplaatst, kan Mars enkel observeren wanneer deze zich in het gezichtsveld ('Field-Of-Regard') van het instrument bevindt (tussen 85° en 135°). Dit beperkt de observaties tot de maanden net voor of net na de Marsopposities, die zich ongeveer om de twee jaar voordoen. De data in deze afbeelding werden berekend op basis van een (inmiddels verschoven) lanceerdatum in oktober 2018 en vereisen aanpassing zodra de exacte lanceerdatum bekend is.

nen de spoorstoffen? (methaan heeft een zeer korte, tot nu toe onverklaarde levensduur in de Marsatmosfeer van 4 tot 0,6 jaar.) NOMAD is geoptimaliseerd om zowel de hoofdbestanddelen als de spoorstoffen in de atmosfeer te detecteren. We hopen zo chemische verbindingen te detecteren en in detail te karakteriseren, zoals methaan en andere organische moleculen die in de methaanchemie betrokken zijn, koolstofmonoxide, waterdamp en gassen die met vulkanische activiteit en de zwavelcyclus (SO₂, H₂S, carbonylsulfide (COS)) geassocieerd worden.

De belangrijkste beperking van dergelijke observaties is de aanwezigheid van de aardatmosfeer.

een groot deel opgebouwd zijn uit dezelfde chemische elementen. Het is zeer moeilijk om een absorptielijn van de aardatmosfeer te onderscheiden van eenzelfde absorptielijn van de Marsatmosfeer. Om deze taak te vergemakkelijken worden de waarnemingen uitgevoerd wanneer Mars zich met voldoende snelheid van de aarde verwijderd of nadert. Door het dopplereffect zijn de lijnen in het spectrum die afkomstig zijn van Mars verschoven ten opzichte van de lijnen van hetzelfde atoom of molecuul in de aardatmosfeer. Van alle verbindingen in de aardatmosfeer verstoort waterdamp het meest de observaties. En water is overal op aarde! Daarom zijn de meeste sterrenwachten in woestijnen of op bergtoppen gebouwd, waar de lucht erg droog is. Sommige telescopen bevinden zich in vliegtuigen, zoals het SOFIA-observatorium, dat instrumenten meeneemt tot een hoogte van 8-15 kilometer. Ruimtetelescopen in een baan rond de aarde, zoals de Hubble Space Telescope en binnenkort de James Webb Space Telescope (JWST), hebben helemaal geen last van de dampkring. De JWST is ontwikkeld om zeer zwak licht van verre objecten waar te nemen (*Zenit* juni 2016, blz. 12-16), maar zal ook in staat zijn om planeten in ons zonnestelsel te bestuderen, zoals Mars. De telescoop zal in het Lagrangepunt L2¹ geplaatst worden in het zon-aarde-systeem, op 1,5 miljoen kilometer van de aarde. De observatie van Mars zal afhangen van zijn positie aan de hemel.

De JWST kan de hemel slechts waarnemen in een zeer specifiek gedeelte waarin de zonnestraling kan worden gemaskeerd om zo zwakke objecten zichtbaarder te maken. Dit betekent dat de JWST Mars slechts om de twee jaar zal kunnen waarnemen (Figuur 7). De JWST-metingen zullen ons echter in staat stellen om de waarnemingen die onder andere door NOMAD uitgevoerd zijn te bevestigen, aangezien de ruimtetelescoop gebruikt zal worden om in te schatten hoeveel water verloren is gegaan op Mars in de loop van haar geschiedenis.

Het is duidelijk dat er nog veel te ontdekken valt op Mars. Hoewel de laatste decennia vele missies zijn gelanceerd om de planeet in al haar facetten te bestuderen, zijn er nog veel mysteries die op opheldering vragen. Waar is al het water gebleven dat in het verre verleden over het planeetoppervlak stroomde? Wat is de oorsprong van het methaan op Mars? Was er ooit leven op Mars? Deze mysteries kunnen enkel opgelost worden met steeds gevoeligere en nauwkeurigere instrumentatie. ●

Planeetonderzoek vanaf de (omgeving van de) aarde

Mars wordt niet enkel bestudeerd aan de hand van instrumenten die in een baan rond de planeet draaien, maar ook vanaf de aarde aan de hand van krachtige telescopen die gekoppeld zijn aan gevoelige spectroscopen. Deze zijn over het algemeen in staat om de planeet met een hoge spectrale resolutie, maar met een lage ruimtelijke resolutie te observeren. Die metingen geven informatie over de totale kolommen van de atmosfeer en niet over de verticale verdeling. Daarentegen geven ze zeer snel een globaal overzicht. De belangrijkste beperking van dergelijke observaties is de aanwezigheid van de aardatmosfeer. Die absorbeert een groot deel van de straling die van Mars komt en bovendien lijken hun absorptiespectra ook veel op elkaar doordat beide planeten voor

¹ Een Lagrangepunt is een punt waarin een klein object als een satelliet een stabiele baan kan behouden in het zon-aarde-systeem, om van hieruit de objecten aan de hemel te bestuderen. Het punt L2 bevindt zich op de as zon-aarde, met de aarde tussen de zon en de satelliet. Zie ook *Zenit* juni 2015, blz. 17.