

RUIMTE-ONDERZOEK

Voor het nu lopende Marsonderzoek werden alle mondiale wetenschappelijke krachten gebundeld.

Ons land, en meer specifiek het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA), verleent hieraan een belangrijke bijdrage.

Zo heeft BIRA een optische spectrometer SPICAM-S mede ontwikkeld die de karakteristieken van atmosfeer en klimaat op de planeet Mars moet vaststellen.

Wetenschappelijke medewerkers :

M. Ackerman, H. Deceuninck, C. Hermans, D. Moreau, C. Muller, E. Neefs, W. Peetermans, P. Simon (BIRA, Brussel)
O. Korablov, V. Moroz, A. Rodin (IKI, Moscou)

Technische medewerkers :

P. Asscherickx, F. Coremans, S. Schadeck, P. Soupart, E. Van Ransbeeck (BIRA, Brussel)
V. Jegoulev, A. Krisko, V. Troshin (IKI, Moscou)

SPICAM-S onderzoekt atmosfeer op Mars

Een Belgische ontwikkeling

Binnen de verkenning van het zonnestelsel is de planeet Mars ongetwijfeld een van de interessantste studieobjecten. Haar atmosferische en geologische structuur vertoont veel gelijkenis met die van de aarde in haar ontstaansfase. Het onderzoek van Mars, en vooral van haar evolutiedynamika, kan bijdragen tot een beter begrip van de ingewikkelde evolutie van onze eigen planeet.

Amerikaanse en Russische ruimteprojecten hebben in de laatste drie decennia de kennis van Mars aanzienlijk vergroot. Met de Russische sonde *Phobos* gebeurde in 1988 voorlopig de laatste succesvolle verkenning van Mars. Desondanks blijft deze planeet toch vele fundamentele wetenschappelijke vragen oproepen.

Op het eind van de jaren tachtig werd daarom door de voormalige Sovjet regering en de Russische ruimtevaartorganisatie de beslissing genomen, opnieuw werk te maken van de exploratie van Mars. Dit leidde uiteindelijk tot plannen voor een dubbelmissie die *MARS-94/96* werd gedoopt en tot doel heeft satellietwaarnemingen (baanexperimenten) te combineren met in situ metingen (afdaalexperimenten).

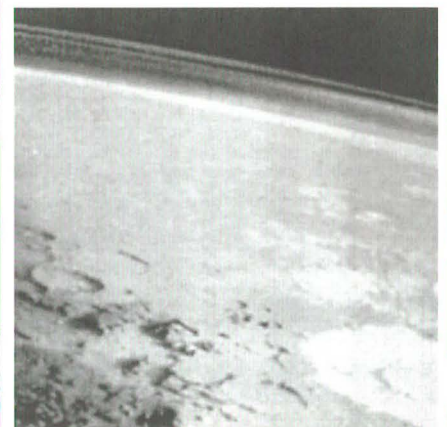
Het mislukken van de Amerikaanse *Mars-Observer* missie op 21 juli 1993, ongeveer een maand voor de geplande plaatsing in een baan rond Mars, heeft de aandacht vanuit de wetenschappelijke wereld volledig toegepitst op de *MARS-94/96* sondes.

Toen beroep gedaan werd op de medewerking van de gehele wetenschappelijke wereld, stelde een Belgisch-Frans-Russisch wetenschappelijk team SPICAM voor, een baanexperiment voor het bestuderen van de Marsatmosfeer. SPICAM staat voor "Spectroscopie pour l'Investigation des Caractéristiques de l'Atmosphère de Mars" en omvat meerdere instrumenten. SPICAM-S, het instrument dat

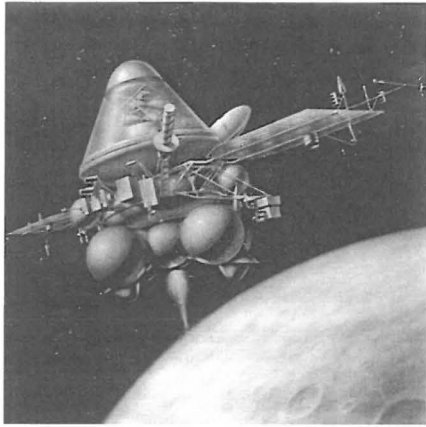
ontworpen en ontwikkeld werd onder de verantwoordelijkheid van het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA), verdient verder enige toelichting.

Onderzoeksopdracht

De lancering van de eerste satelliet, waarop zich vooral baanexperimenten bevinden, is voorzien in oktober 1994. De tweede satelliet draagt vooral afdaalexperimenten (ballons, kleine weerstations, bodemindringers en een Marswagentje), maar ook enkele baanexperimenten. Hij wordt gelanceerd in 1996. Beide lanceringen gebeuren vanaf de lanceerbasis Baikonour in Kazakstan. De satellieten worden in een baan om de aarde gebracht door een Proton-draagraket, alvorens hun interplanetair traject aan te vangen. Na een vlucht van 315 dagen wordt de satelliet via een aantal tijdelijke banen overgebracht naar zijn definitieve werkbaan, vanwaar Mars gedurende ongeveer een jaar zal onderzocht wor-



Unieke foto van de Marsatmosfeer.



Animatie van de MARS-94 missie.

den. De werkbaan heeft haar pericentrum op een hoogte van 200 tot 300 km en wordt doorlopen in 12 uren. De helling van het baanvlak ten opzichte van het evenaarvlak van Mars schommelt tussen 70° en 80°.

De belangrijkste streefdoelen van MARS-94/96 situeren zich op het vlak van Mars' evolutie, haar atmosfeer, oppervlak, inwendige en elektro-magnetische omgeving.

Om een idee te krijgen van de evolutie van deze planeet, zullen de fysische en chemische processen die er zich afspelen of afgespeeld hebben grondig bestudeerd worden.

De nuttige lading van MARS-94/96 kan ruwweg ondergebracht worden in vier onderzoeksdomeinen: het oppervlak (topografie, mineraalstudie, bodemsamenstelling), de atmosfeer en het klimaat (atmosfeersamenstelling, verticale verdeling en variatie van bestanddelen, temperatuur- en drukmonitoring), het inwendige (korst, kern, magnetisch veld, warmtestroom) en het plasma (magnetische dipool, structuur van de magnetosfeer, verdeling en energetische samenstelling van het plasma).

SPICAM-S hoort bij de atmosfeerexperimenten en zal zowel aan de missie in 1994 als in 1996 deelnemen.

De aëronomie van Mars

De eerste kennis over de atmosfeer van Mars werd opgedaan via waarnemingen vanaf de aarde, later ook via in situ satellietwaarnemingen. Dit onderzoek leverde nauwkeurige metingen op van de fundamentele atmosferische parameters: de temperatuur, de druk

aan het planeetoppervlak, de winden en de chemische samenstelling.

Tot nu toe werden acht molekulen aangetroffen in de Marsatmosfeer. Tele-skoopobservaties vanop de aarde leidden tot de ontdekking van CO₂, O₂, CO en waterdamp. Latere satellietwaarnemingen rond en in de atmosfeer van Mars duiden op de aanwezigheid van O₃, Ar en N₂. Tijdens de laatste ruimtemissie naar Mars (Phobos) werden ook organische molekulen aangetroffen. Deze laatste ontdekking vraagt evenwel nog om bevestiging.

Komponent	Relatieve samenstelling (%)
CO ₂	95.32
N ₂	2.70
Ar	1.50
O ₂	0.13
CO	0.07
H ₂ O	0.01
O ₃	10 ⁻⁴
CH ₂ O	< 10 ⁻⁵

Tabel 1: Huidige kennis van de samenstelling van de Marsatmosfeer.

Komponent	Atmosfeerdikte (Atmos-cm, STD)	Komponent	Atmosfeerdikte (Atmos-cm, STD)
H ₂ S	27	HCN	0.096
HBr	8.2	C ₂ H ₂	0.064
HCl	3.7	H ₂ CO	0.026
CH ₃ Cl	0.32	CH ₄	0.026
CH ₃ I	0.28	C ₂ H ₄	0.012
CH ₃ Br	0.19	NO	0.005
CH ₂ Cl ₂	0.18	OCS	0.004
CH ₂ Br ₂	0.15	SO ₂	0.004
N ₂ O	0.13	NO ₂	0.002

Tabel 2: Bovengrenzen voor de minderheidsbestanddelen in de atmosfeer van Mars.

Belang van CO₂

De aardse atmosfeer ondergaat tegenwoordig belangrijke wijzigingen, hoofdzakelijk te wijten aan menselijke activiteit. Een belangrijk fundamenteel probleem van het einde van deze eeuw is het broeikas effect, dat te maken heeft met de absorptie-eigenschappen van de atmosfeer. Verhoogde CO₂-concentraties, een gevolg van de sterke industrialisering van de planeet, kunnen een belangrijke rol spelen in haar thermische balans en dus het klimaat wijzigen.

Een ander heet hangijzer van de aardse aëronomie is de afname van de totale ozonconcentratie in de lage stratosfeer.

De atmosfeer van Mars is het laboratorium bij uitstek voor de analyse van deze problemen. Het grote voordeel ervan is dat de atmosfeer er voor het overgrote deel uit CO₂ bestaat, wat toelaat in extreme omstandigheden het effect van CO₂ op de aëronomie te onderzoeken.

Op de koop toe zweven in de marsatmosfeer stofdeeltjes en aërosols, die waarschijnlijk als katalysator optreden in processen zoals dewelke op aarde verantwoordelijk zijn voor de ozonvermindering.

De vergelijkende studie van aëronomische processen op aarde en op Mars zal leiden tot een beter begrip van specifieke aardse atmosfeerproblemen.

Ondanks meerdere waarnemingen van CO en een goede overeenstemming in de data, bestaat geen duidelijk

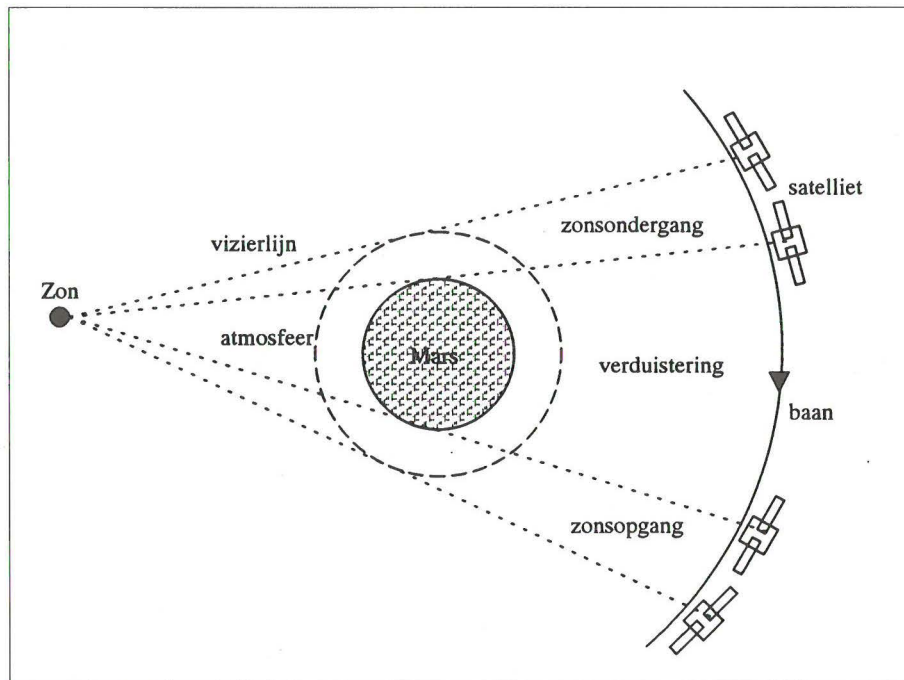


Fig. 1 : De zonsverduisteringstechniek.

beeld van de schommelingen van deze konstituent in functie van de hoogte en de geografische ligging. Uit de Phobos missie kwam een verticale verdeling van de CO-koncentratie naar voor, die noch theoretisch, noch proefondervindelijk kan verklaard worden. Andere onopgeloste aëronomische raadsels zijn : de plotse opwarming die werd waargenomen in de stratosfeer aan de polen tijdens de winter, de geografische en jaarlijkse fluctuaties in de concentratie van waterdamp, de fysische en chemische invloed van stofstormen op de atmosfeerstructuur en de mogelijke aanwezigheid van organisch materiaal in de huidige atmosfeer van Mars.

SPICAM-S bestudeert Marsatmosfeer

SPICAM-S heeft tot doel de karakteristieken van de Marsatmosfeer vast te stellen, voornamelijk door de verticale verdeling van de hoofdbestanddelen (CO₂, H₂O, O₃, O₂, CO, stof en aërosols) en hun variatie in tijd en lokatie te meten. Daarnaast dragen ook het in kaart brengen van temperatuur en druk, het observeren van de ionosfeerstructuur en diens interactie met de zonnewind, het bepalen van de exosferische temperatuur, het bestuderen van de atmosferische transportprocessen en het sporen naar onbekende componenten, bij tot het vormen van een glo-

baal beeld van de Marsatmosfeer en haar evolutie.

Eerder gedane waarnemingen lijken te wijzen op de belangrijke rol die waterdamp vervult in de atmosfeer van Mars. Fotochemisch gevormde waterstofproducten schijnen in te werken op de stabiliteit van deze CO₂-atmosfeer en op de samenstelling van diens sporelementen, zoals CO, ozon (O₃) en O₂. Dynamische processen en de aanwezigheid van stof en aërosols in de gebieden waar fotochemie mogelijk is, bemoeilijken nog een juiste analyse. Daarom dient het gevoerde onderzoek op korrekte temperatuurs- en verticale densiteitsprofielmetingen gebaseerd te zijn.

Een kwasi gelijkaardig fenomeen wordt gekonstateerd in de aardse mesosfeer, waar de samenstellingsveranderingen van CO en ozon verband houden met seizoensgebonden veranderingen van de waterhoeveelheid met de breedteligging. Naast het op zich interessante onderzoek van de aëronomie van Mars zelf, zal de analyse van daar optredende fenomenen leiden tot een beter verstaan van wat zich afspeelt in de eigen aardse atmosfeer.

SPICAM-S : technische beschrijving

SPICAM-S is een 20 kg zwaar, doosvormig instrument. De afmetingen van het aluminium geheel basisplaat/deksel zijn 478 bij 445 bij 215 mm. Uitwen-

dig laat het zich het best beschrijven door een opsomming van haar verschillende interfaces.

Vier speciaal ontworpen titaan bouten vormen de mechanische interface met het satellietlichaam.

De termische interface bestaat uit meerdere elementen. De warmteuitwisseling met de satelliet doorheen de bevestigingsbouten is beperkt tot 10 K/W. Een glasvezel-Kapton gelaagde termische deken beschermt SPICAM-S tegen beïnvloeding van de koude ruimte en naburige instrumenten. Tenslotte zorgt een radiator voor een passieve koeling van een temperatuur-critisch onderdeel van het experiment.

De onvermijdelijke optische interface is een cirkelvormige opening met een diameter van 60 mm in de bovenzijde van het instrument. Wanneer het instrument niet funktioneert wordt de opening afgesloten. Ze wordt heropend voor iedere waarneming.

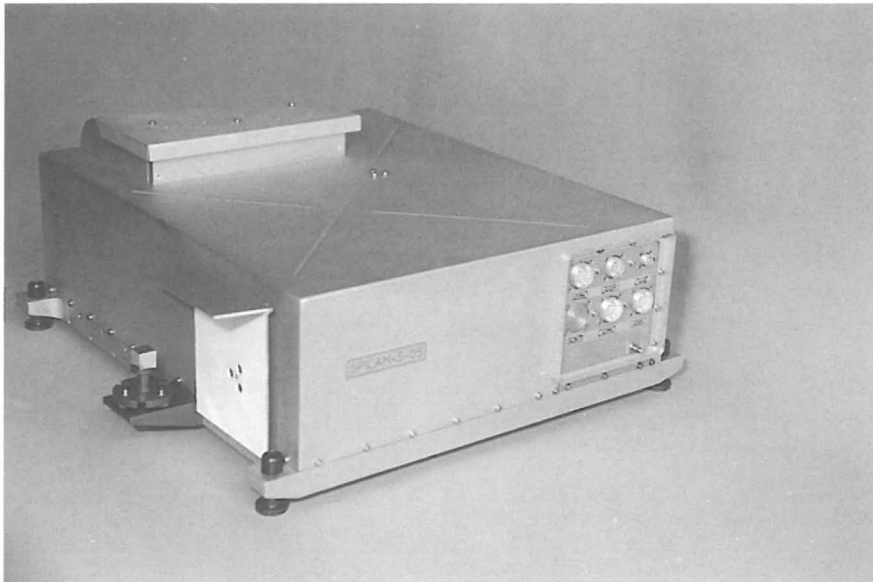
SPICAM-S heeft zes uitwendige connectors : twee voor de elektrische interface met een centrale elektronika blok (voeding en communicatie) en één voor een directe interface met de satelliet (noodopening van het afsluitsysteem). De drie andere connectoren laten de autonome werking of juist het buiten werking stellen van onderdelen van het experiment toe.

Het totale vermogenverbruik van het experiment bedraagt ongeveer 52 W.

Absorptie spektroskopie met behulp van de zonsverduisteringstechniek

Spektroskopie is de wetenschap die de aard en samenstelling van een lichtbron tracht te achterhalen op basis van haar spectrum. Wanneer daarnaast het spectrum van een lichtbron (bijvoorbeeld de zon) wordt gewijzigd ten gevolge van absorptie door chemische elementen bij bepaalde golflengtes, wordt dit absorptiespektroskopie genoemd.

Gedurende de korte periodes dat de zon, de Marsatmosfeer en de satelliet zich op één lijn bevinden, draagt het zonlicht, dat in de atmosfeer fotochemisch reageert, bij aankomst in het instrument informatie over de samenstelling van die atmosfeer op dat precies moment (seizoen, lokale tijd) en die precieze plaats (breedte-, lengte- en hoogteligging).



Uitwendig zicht op SPICAM-S.

heeft gericht. De vier blokken (twee spektrometerkanalen, afsluitsysteem/zonnevolger en controlecamera) worden gestuurd door vier volledig onafhankelijke elektronische eenheden, elk met een eigen mikroprocessor of mikrocontroller.

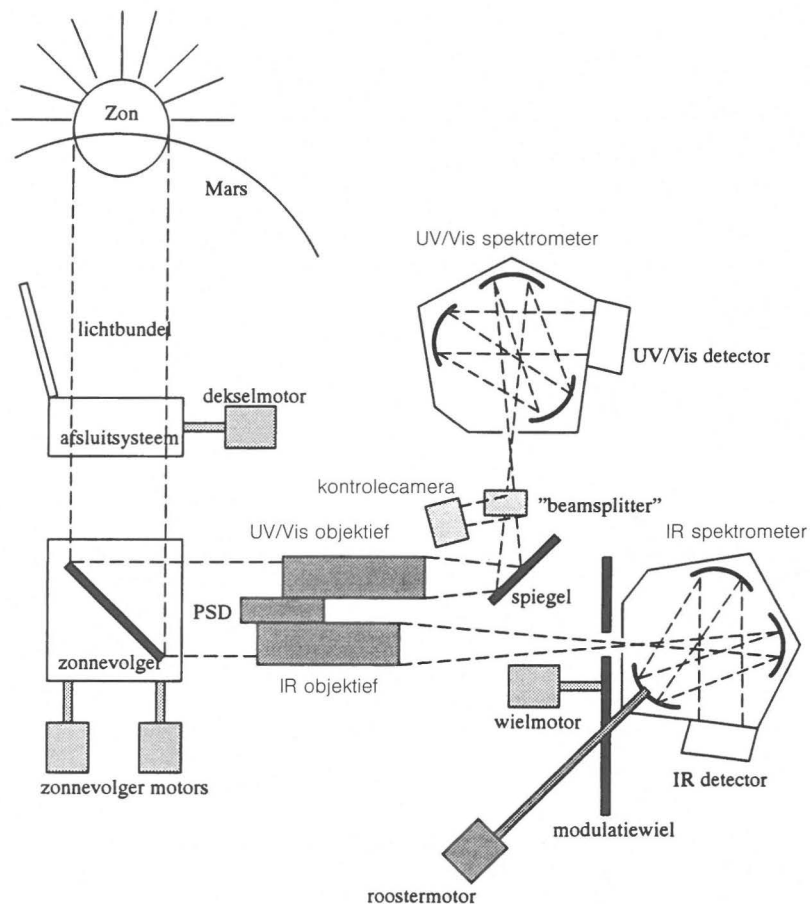
Werkingsprincipe

Waarnemingsperiodes voor SPICAM-S komen niet vaak voor. Gezien vanuit het instrument zal de zon tijdens elke planeetomwenteling van de satelliet in principe een keer onder- en een keer opgaan. Enkel tijdens deze twee korte periodes kan de atmosferische absorptie van het zonlicht gemeten worden. SPICAM-S kan in twee modes werken : enkel een zonsondergang meten of een zonsonder- plus een zonsopgang meten. In beide modes worden de spektrometers ongeveer vijftien minuten voor de

SPICAM-S is een optische spektrometer, gevoelig in het ultraviolette, zichtbare en infrarode deel van het zonnespektrum. Het instrument is opgesplitst in twee spektrometerkanalen : een ultraviolet en zichtbaar kanaal (200 tot 750 nm) en een infrarood kanaal (1.8 tot 5 μm). Elk kanaal bestaat uit de spektrometer zelf, voorafgegaan door een focuserend optisch systeem en gevolgd door een gekoeld detectiesysteem.

Aangezien SPICAM-S de zon als lichtbron gebruikt, moet het experiment zich naar de zon richten en ze volgen. Door de satelliet zelf wordt ervoor gezorgd dat de inlaatopening van SPICAM-S steeds naar de zon gericht is met een nauwkeurigheid van +/- 1°. Daarom moeten door de zonnevolger van het instrument slechts kleine correcties ten opzichte van het zonnevolgingssysteem van de satelliet aangebracht worden. De SPICAM-S zonnevolger is opgebouwd rond een spiegel die zich onder de inlaatopening van het experiment bevindt en die het invallende zonlicht weerkaatst naar de spektrometerkanalen en naar een positiedetector (PSD). Deze detecteert de positie van de zon en koppelt die informatie terug naar een motorsturing voor de spiegel.

Tenslotte bevat SPICAM-S nog een controlecamera, die beelden met lage resolutie maakt van de zonneschijf en zo een aanwijzing geeft over de vorm van de waargenomen zon en het punt van de zon waarop het instrument zich



SPICAM-S, blokdiagram.

voorspelde waarnemingsperiode aanzet. Vijf minuten later, de tijd om de detectiesystemen af te koelen, worden de andere twee elektronica eenheden (van zonnevolger en controlecamera) aangeschakeld. Het aanschakelen van een eenheid gaat steeds gepaard met de configuratie van de betrokken eenheid.

Voordat het deksel zich opent, worden door de drie detectorkanalen (UV/zichtbaar, infrarood en controlecamera) enkele donkerspektra genomen. Zodra het deksel volledig open is, begint de zonnevolger zijn taak en worden in de drie detectorkanalen spektra waargenomen en opgeslagen in een ringgeheugen.

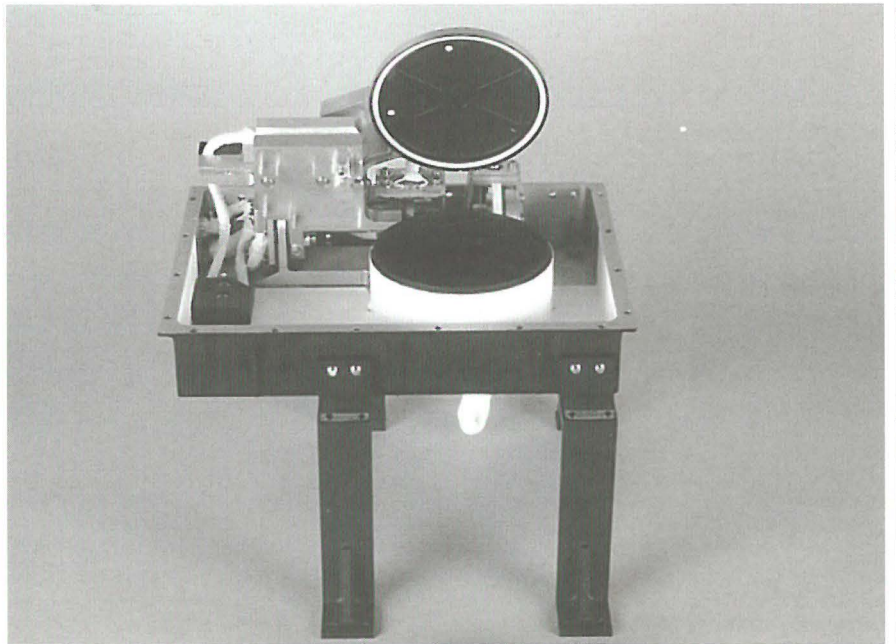
Wanneer de lichtintensiteit onder een vooropgestelde drempel is gedaald, worden de detectorkanalen afgeschakeld. We weten ook dat de laatst waargenomen spektra de bruikbare "atmosfeer"-informatie bevatten. Indien enkel een zonsondergang wordt geobserveerd, sluit het deksel zich, zoniet blijft het tijdens de zonsverduistering open, tot de zonsopgang is waargenomen. In elk geval wordt het zonnevolgerkanaal afgeschakeld.

Voor de observatie van de zonsopgang wordt hetzelfde stramien gevolgd als voor een zonsondergang. Vijftien minuten voor zonsopgang worden de twee spektrometerkanalen aanzet en gekonfigureerd, hun detectorsystemen koelen af, het zonnevolgerkanaal en de controlecamera worden aangeschakeld en in configuratie gebracht, donkerspektra worden geregistreerd (met een open deksel).

De zon wordt onmiddellijk gevolgd zodra ze vanachter de planeet te voorschijn komt. Tegelijk begint de waarneming en het opslaan van spektra. Wanneer de zon de atmosfeer "verlaat", worden de drie detectorkanalen afgezet. Alle geregistreerde spektra bevatten nu nuttige informatie. Na het afsluiten van het instrument wordt het zonnevolgerkanaal afgezet.

Het afsluitsysteem

Het afsluitsysteem moet veelvuldig geopend en gesloten kunnen worden. Toch is het uitgerust met een onomkeerbaar pyrotechnisch noodopeningssysteem. Het afsluitsysteem moet in de eerste plaats het inwendige van het instrument, de optische elementen en de elektronica, beschermen tegen stof en straling tijdens inactiviteit. Bovendien is het zo ontworpen dat, geopend of gesloten, zo weinig mogelijk parasitair licht het instrument binnendringt.



Het afsluitsysteem.

Het afsluitmechanisme wordt gemonteerd op een plateau met een opening van 60 mm diameter. Rond de opening is een afscherming aangebracht tegen parasietlicht. Het plateau wordt via vier poten bevestigd op de basisplaat van het instrument.

De as van het stappenmotor-demultiplicatiesysteem dat het deksel aandrijft, staat loodrecht op de as van het deksel. De overbrenging van de motor- naar de dekselbeweging gebeurt door middel van wormschroef en wormwiel (48:1). De dekselas is opgehangen in sokkels tussen kogellagers die de rotatie mogelijk maken.

Op de as van het deksel zijn, met speciale pinnen, de twee armen bevestigd van een pyrotechnische kabelsnijder. Het deksel is aan de kabelsnijder verbonden door de kabel en een veer. Dit betekent dat in normale werking deksel en noodopeningssysteem samen de openings- of sluitingsbeweging maken. Wanneer echter de kabel wordt doorgesneden zal het deksel, geholpen door de veer, zich alleen openen doordat het vrij kan roteren tussen de twee ophangingsarmen van de kabelsnijder.

Drie positiedetectoren geven aan of het deksel respectievelijk geopend, gesloten of geblokkeerd is. De geblokkeerde positie wordt enkel tijdens de lancering ingenomen. Het aanleggen van een extra motorkoppel zorgt er dan voor

dat het deksel niet opent ten gevolge van vibraties.

Het volledige oppervlak van het afsluitsysteem is optisch zwart geanodiseerd. Enkel het gedeelte dat wordt blootgesteld aan het zonlicht wanneer het afsluitsysteem open is, wordt wit geschilderd om oververhitting te voorkomen.

De kabel van het noodopeningssysteem kan doorgesneden worden door twee messen die zich samen met een explosief in kleine kamers bevinden. In de explosieve stof bevinden zich twee weerstanden die onder stroom opwarmen, een explosie veroorzaken en de messen uit de kamers drijven.

Het afsluitsysteem wordt, zoals heel SPICAM-S, bestuurd door een microprocessor (80C186), meer bepaald door drie microprocessorsignalen: een "stap"-, een "richtings-" en een "aktiveringssignaal". Een binaire teller telt de "stappulsen" en adresseert de vier motorfazen volgens zijn twee LSBits. Zo wordt nooit een faze overgeslagen en dient de teller nooit een reset te ondergaan. De beslissing op of af te tellen wordt genomen op basis van het "richtingssignaal".

De zonnevolger

Het zonnevolgingssysteem moet de optische as van SPICAM-S op het zonnecentrum richten met een minimale

nauwkeurigheid van $1'$, veel beter dus dan de nauwkeurigheid van $\pm 1^\circ$ die gegarandeerd wordt door het zonnevolgingssysteem van de satelliet zelf. Een positiegevoelige detector (PSD) herkent het invalspunt van de zonnebundel op de motorgestuurde spiegel van de zonnevolger. De afstand tussen dit invalspunt en de optische as van het instrument wordt door een mikroprocessor systeem omgerekend naar het aantal stappen dat de motoren van de zonnevolger moeten uitvoeren om lichtbundel en optische as te laten samen vallen. Deze correctie wordt continu uitgevoerd.

De snelheid waarmee deze correcties worden uitgevoerd werd zo groot mogelijk gekozen, terwijl er ook voor gezorgd werd dat elke ingenomen positie zo snel mogelijk stabiel is. Een motor stap neemt 3 ms in beslag de stabilisatietijd erna ligt rond de 40 ms. Dit geeft een correctiesnelheid voor kleine verplaatsingen van ongeveer $120''/s$. Lange verplaatsingen voert de zonnevolger uit in salvo's. De stabilisatie gebeurt pas aan het einde van een salvo, niet na elke pas. Zodoende kan een maximale correctiesnelheid bereikt worden van meer dan $1700''/s$. Wetend dat de drift van de satelliet $18''/s$ bedraagt, is het duidelijk dat de SPICAM-S zonnevolger deze ruimschoots opvangt.

De spiegel van de zonnevolger zit in een beweegbare structuur die vervaardigd werd uit een aluminiumlegering. Deze beweegbare structuur is opgehangen in een vaste structuur onder

een nominale hoek van 45° ten opzichte van de optische as. Een cardan systeem met flexibele plaatveertjes ontkoppelt beweegbare en vaste structuur. De spiegel kan rond twee loodrecht op mekaar staande assen bewegen door middel van stappenmotoren die via een nok in inox en twee wrijvende keramische wieltjes met de rotatieassen gekoppeld zijn. De spiegel van de zonnevolger is ellipsvormig en vlak. Het effectief weerkaatsend oppervlak heeft dezelfde diameter als de opening van het afsluitsysteem, namelijk 60 mm. Een planparalleliteit van $\lambda/2$ is verzekerd. De spiegel heeft een aluminium substraat met daarop een Kanigen metallisatie om een glad oppervlak te bekomen. Vervolgens werd een aluminiumlaag aangebracht die licht weerkaatst van het ultraviolette tot het infrarode golflengtegebied, en ten slotte nog een beschermende siliciumlaag.

Het PSD en het bijhorende focusserende lenzensysteem liggen in een cilindervormige behuizing die een geheel vormt met het SPICAM-S objectief. Dit objectief bevat ook de mechanische structuur van de optische elementen voor het infrarode en het ultraviolet en zichtbaar kanaal.

De PSD optika is tweeledig: een planoconvexe lens uit gesmolten silicium (focaallengte 80 mm) en een zwart geanodiseerd aluminium diafragma. Het gevoelig oppervlak van het PSD ($4,7 \text{ mm} \times 4,7 \text{ mm}$) is in vier kwadranten opgedeeld, elk met een uitgang die een stroom voert, evenredig met de hoe-

veelheid ingevallen licht.

Wanneer in de buurt van Mars metingen worden gedaan, zal de totale PSD stroom schommelen tussen $350 \mu\text{A}$ (voor een volle Zon) en $3,5 \mu\text{A}$ (voor een Zon net voor de volledige verduistering). Het PSD heeft een spektraalrespons tussen 300 en 1100 nm en een positienuwkeurigheid van $2,5 \mu\text{m}$. De totale nauwkeurigheid van het zonnevolgingssysteem is de som van de mechanische, de elektrische (A/D-omzetting) en de PSD-nauwkeurigheid en bedraagt $9,52 \mu\text{m}$.

Gezien een volledige exkursie van de zonnevolger ($1^\circ 42'25''$) in ongeveer 1150 motorstappen wordt uitgevoerd, is de relatie tussen de hoekverplaatsing en de lineaire verplaatsing van de lichtvlek op het PSD $1,3''/\mu\text{m}$ en bijgevolg de angulaire nauwkeurigheid van de zonnevolger $12''$.

Beide stappenmotoren van de zonnevolger zijn van hetzelfde type als de motor van het afsluitsysteem. Hun demultiplikatoren hebben een overbrengingsverhouding van 48 over 1. Daarom is ook de stuurlektronika voor de motoren dezelfde als die bij het afsluitsysteem met inbegrip van de 80C186 mikroprocessor.

De motoren van het zonnevolgingssysteem zijn echter telkens slechts met één positiedetector uitgerust. Zij worden enkel gebruikt als referentiepunten voor de spiegelbeweging (op deze plaatsen draait de spiegel automatisch zijn beweging om, niettegenstaande de motoren in dezelfde richting blijven roteren).

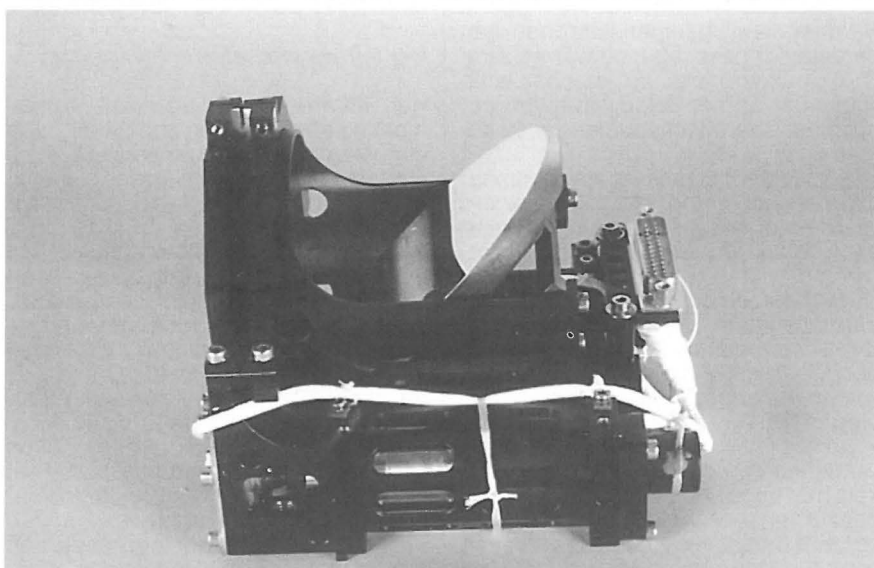
Alle taken van het mikroprocessorsysteem (openen, sluiten, zonnevolging, externe communicatie) werden volledig in assembler geprogrammeerd.

Het ultraviolet en zichtbaar spektrometer kanaal

De ultraviolet en zichtbaar spektrometer registreert absorptiespektra van de Marsatmosfeer in het golflengtegebied tussen 200 en 750 nm. Als optimale golflengte werd 300 nm vooropgesteld. De ruimtelijke resolutie van het instrument is afhankelijk van de afstand tot de atmosfeer, maar is voor de MARS-94 vlucht steeds beter dan 3,5 km.

Vanuit mechanisch standpunt kan dit spektrometerkanaal in drie blokken worden opgedeeld, die allen op de basisplaat van het instrument gemonteerd worden: de behuizing van het objectief, van de spektrometer en van het detectiegeheel.

De behuizing van het ultraviolet en zichtbaar objectief vormt samen met



De zonnevolger.

die van het infrarood objektief en van de PSD optika één geheel. De spektrometer heeft een zeskantige vorm met een inlaat- en een uitlaatopening. De behuizing van het detectorsysteem heeft de vorm van een rond konservenblik waarin een Reticon detector met zijn nabijheidselektronika en een Peltier koeler zijn gemonteerd. Alle elementen zijn zwart geanodiseerd en hebben een ontgassing ondergaan.

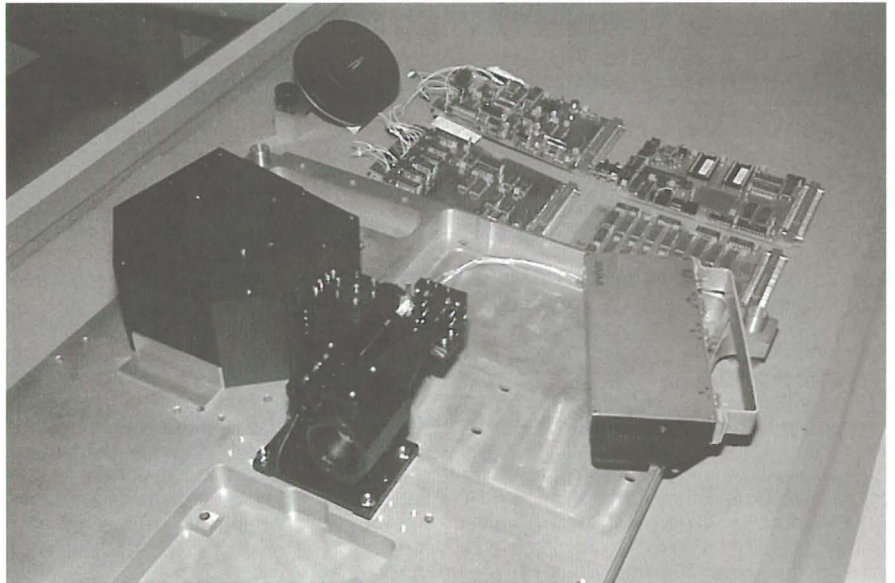
De belangrijkste eis bij het ontwerp van het ultraviolet en zichtbaar objektief is het F-getal dat gelijk moet zijn aan dat van de spektrometer, namelijk 3,7. Het focuserend lenzensysteem bestaat uit vijf lenzen in calciumfluoride en gesmolten silicium. De focaallengte van het geheel bedraagt 70,33 mm. F-getal en focaal bepalen de diameter van het objektief: 19 mm. Aangezien het om redenen van inplanting onmogelijk is de twee spektrometers naast mekaar te plaatsen, buigt een spiegel, net na de lenzen, de invallende lichtbundel in het ultraviolet en zichtbaar kanaal over 90°.

Alvorens het gefocuseerde licht op de ingang (een gaatje met een diameter van 25 μm) van de spektrometer valt, gaat het nog door een "beamsplitter". Deze beamsplitter bestaat uit een Polka-dot matrix die gesandwiched is tussen twee prisma's. De prisma's worden samengehouden met Epotek-305 lijm die bij 250 nm een minimale transmissiefactor van 75% heeft.

Het doel van de beamsplitter is een klein deel van de lichtbundel af te splitsen naar de controlecamera toe. Toch komt het merendeel van het licht (90%) in de ultraviolet en zichtbaar spektrometer terecht. De totale transmissie van het ultraviolet en zichtbaar objektief bedraagt 33% bij 250 nm en is minstens 39% boven 300 nm.

Als spektrometer wordt een "gekruste" Czerny-Turner spektrograaf - monochromator van Oriël gebruikt, die het beeld aan de ingang in een één tot één verhouding doorgeeft naar de uitgang. Twee met magnesiumfluoride (MgF_2) bedekte spiegels en een vast vlak rooster (300 lijnen per mm) bevinden zich in drie hoeken van de spektrometer. Het lijkt of het licht in de spektrometer zichzelf "kruist". De eerste spiegel vangt het inkomende divergerende licht op en weerkaatst het als een homogene lichtbundel naar het rooster. Dit rooster zorgt voor de dispersie van het licht over het golflengtegebied tussen 200 en 750 nm. De tweede spiegel tenslotte focuseert de eerste diffractie orde van het licht op de uitgang, waar zich de detector bevindt.

De detector is een zelf scannende foto-



Het ultraviolet en zichtbaar kanaal.

diodelijn van Reticon met 1024 silicium fotodiodes van 25 μm bij 2,5 mm. Bij kamertemperatuur kan de integratietijd oplopen van 64 μs tot 300 ms. De spektraalrespons van de detector ligt tussen 200 en 1100 nm met een maximum bij 750 nm. Om de donkerstroom en andere parasitaire effecten in de hand te houden moet het gevoelige oppervlak van de detector gestabiliseerd worden op een temperatuur tussen -20 en -30° C. Daarvoor zorgt een driertraps Peltier koeler. Zijn koude zijde is door middel van lijm met goede warmtegeleidingseigenschappen aan de detector bevestigd, de warme zijde is gebraseerd op de mechanische structuur van het detectiesysteem om optimale warmteëvacuatie te bekomen.

Het volledige ultraviolet en zichtbaar detectiesysteem wordt gecontroleerd vanaf een nabijheidselektronika kaart en twee verder afgelegen elektronika-kaarten.

De taak van de nabijheidselektronika is om, bij middel van een integrerende U433 n-kanaal JFET, de ladingen die op de videolijn binnenkomen, om te zetten in laagohmige uitgangsspanningen. Op de eerste "afgelegen" elektronika kaart worden deze spanningen versterkt in twee Operationele Versterkers met hoge snelheid en laag vermogenverbruik (AD847) en aangepast aan het bereik van de 12 bits analoog naar digitaal convertor (AD671). Aan het einde van elke conversie wordt een "data available" signaal naar de pro-

cessor gestuurd om een directe toegang tot het geheugen (DMA) mogelijk te maken. De tweede "afgelegen" elektronika kaart bevat de logische interface tussen de detector en de 80C186 mikroprocessor.

De programmatie van het mikroprocessorsysteem gebeurde in een hogere programmeertaal (C). De belangrijkste delen in de software zijn de externe kommunikatie, de berekening van de integratietijd in functie van het ontvangen signaal, de uitlezing van de detector en de opslag in het geheugen.

Het infrarood spektrometer kanaal

Het infrarood spektrometer kanaal moet de absorptie van zonlicht in de atmosfeer van Mars opmeten in het gebied van het spektrum tussen 1,8 en 5 μm . De optika werd geoptimaliseerd voor 3,5 μm .

Vanuit mechanisch standpunt kan het infrarood kanaal in vijf blokken worden opgesplitst: de behuizing van het objektief, die van de spektrometer en de bijhorende roostersturing, de steun voor detector en nabijheidselektronika, het modulatiewiel met zijn synchronisatiesysteem en tenslotte de koeling. Naast het objektief worden alle blokken gemonteerd op een aparte basisplaat die op haar beurt op de SPICAM-S basisplaat wordt bevestigd.

Het infrarood objektief heeft ook een F-getal van 3,7. De focaallengte bedraagt 111 mm en dus is de diameter 30 mm. Het bestaat uit vier lenzen in si-

licium en germanium en heeft een transmissie van minstens 60%.

De spektrometer is dezelfde als die in het ultraviolet en zichtbaar kanaal, weliswaar aangepast aan het infrarood golflengtegebied. De inlaatopening is spleetvormig (2,5 mm hoog bij 100 μm breed). Het rooster in de spektrometer is vlak en heeft 240 lijnen per mm. Om gans het vooropgestelde golflengtegebied te kunnen bestrijken, moet het rooster in verschillende posities gedraaid worden (invalshoek instelbaar tussen 14° en 26°). De reductie van de roosterstappenmotor is zo gekozen (77:1) dat net 512 stappen tussen beide uiterste posities liggen.

Een stap van het rooster komt daardoor ongeveer overeen met een verplaatsing over één detectorpixel.

De detector bestaat uit twee loodsele-nide (PbSe) pixellijnen van 128 elementen. Elke pixel meet 80 bij 200 μm , tussen de pixels is een afstand van 20 μm . Tussen de twee detectorlijnen is een opening van 5 mm. De breedte van de ingangsspleet en die van de pixels is ongeveer 100 μm wat resulteert in een gezichtsveld van 3 boogminuten of een ruimtelijke resolutie van ongeveer 8 km.

De twee detectorhelften, werken gelijktijdig in twee verschillende diffractieordes. Rekening houdend met het verdraaibaar rooster ligt de eerste diffractieorde tussen 3,28 en 5,11 μm , de tweede orde tussen 1,85 en 2,55 μm . De scheiding tussen de diffractieordes

wordt gemaakt door opaakfilters op de detectors.

Om de detectiegevoeligheid te verbeteren, vooral boven 4,5 μm , wordt de detector gekoeld tot ongeveer -30°C, door middel van een radiator die gericht is naar het heelal. Deze temperatuur wordt permanent stabiel gehouden met een nauwkeurigheid van +/- 0,1°C. In tegenstelling tot detectoren in het ultraviolet en zichtbaar deel van het spectrum, verschilt de conductiviteit van een belichte infrarood detector nauwelijks van een onbelichte. Om een aanvaardbare signaal-ruis-verhouding te bekomen (ongeveer 1000 bij 2 μm en 100 bij 4,7 μm) kan dan ook enkel in AC gekwekt worden. Om die reden wordt de invallende lichtbundel tussen inlaatspleet en spektrometer gemoduleerd door een "chopper"-wiel dat ronddraait met een frequentie van 2,5 kHz (aangedreven door een DC motor). Een synchronisatiesysteem zorgt voor een stabiele rotatiesnelheid van het wiel (ongeveer 0,3 %) en voor een gekoördineerde sturing van 256 "lock-in" versterkers in de uitleeselektronika van de detector.

De elektronika voor het infrarood kanaal bestaat uit twee delen. De nabijheidselektronika zorgt voor voorversterking en "lock-in" van de detectorsignalen en multiplexing van de 256 pixels in 16 kanalen (8 per diffractieorde). Een "afgelegen" elektronika, bestaande uit drie elektronika-kaarten, is opgebouwd rond een in C gepro-

grammeerde 8 bits 87C51FC mikro-controller die telekommando's ontvangt en interpreteert, het instrument stuurt en controleert, zijn data verzamelt en die doorstuurt naar het centrale telemetriestelsel.

De controlecamera

De controlecamera, een CCD, moet kwalitatief een beeld geven van de zon zoals die op het moment van de meting door het instrument wordt waargenomen. Dit moet het mogelijk maken een idee van de vorm van de zon te krijgen (beginnende eclips, vervorming door stofbanden, ...) en te bepalen op welk punt van de zon gericht wordt door de zonnevolger.

Gezien het responsdomein van het CCD (450 tot 1000 nm) is zijn optisch pad identiek aan dat van de ultraviolette en zichtbare spektrometer, tot aan de beamsplitter. Het CCD met zijn nabijheidselektronika wordt onder de beamsplitter op de basisplaat gemonteerd.

In de beamsplitter wordt ongeveer 10 % van het licht dat lenzensysteem en spiegel verlaat gedeveerd naar het CCD.

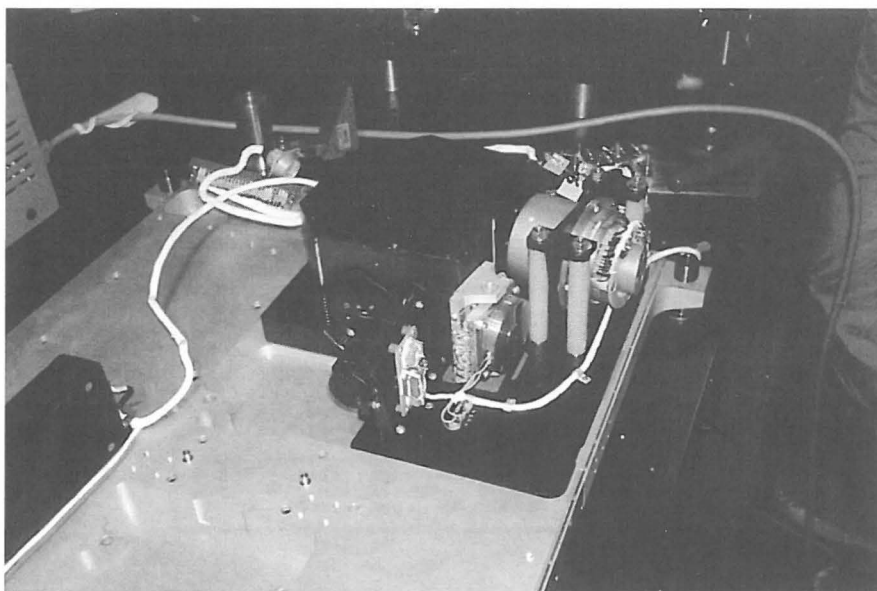
De detector zelf is een tweedimensionale CCD beeldsensor. De 288 x 384 nuttige pixels meten 23 bij 23 μm . De detectorsignalen worden omgezet in 12 bits digitale waarden. Gezien de kwalitatieve toepassing van de controlecamera in SPICAM-S en de beperkte geheugenruimte voor gegevensopslag, zal slechts een oppervlak van 45 bij 45 pixels gebruikt worden en wordt de digitale resolutie teruggeschroefd tot 4 bits.

Bediening van SPICAM-S

Een instrument integreren in een satellietomgeving betekent: het voorzien van een voeding, het in de juiste configuratie brengen en zijn wetenschappelijke data verzamelen.

De satelliet biedt SPICAM-S een 27 V gelijkspanningsvoeding aan. Die wordt verdeeld over de vier DC/DC-convertoeren in het instrument: één voor afsluitsysteem, zonnevolger en controlecamera, één voor het ultraviolet en zichtbaar kanaal, één voor het infrarood kanaal en één voor de Peltier koeler van de ultraviolet en zichtbaar detector.

De gehele MARS-94 missie is voorgeprogrammeerd. De satelliet is uitgerust met een sekwentieprogramma dat op vooraf bepaalde tijdstippen zekere experimenten in werking zet. Dit sekwen-



Het infrarood kanaal.

tieprogramma kan steeds per telekommando vanaf de aarde aangepast worden. Het telemetriesysteem van de satelliet is ontdubbeld: MORION verzamelt hoofdzakelijk de wetenschappelijke data van de instrumenten, TMS slaat de technologische gegevens op. SPICAM-S staat niet rechtstreeks in verbinding met de satelliet, noch met het sekwentieprogramma, noch met het telemetriesysteem. Elke uitwisseling van informatie gebeurt via een centrale eenheid, die SPICAM-BE heet (BE staat voor "bloc électronique"). Het is deze eenheid die door het sekwentieprogramma wordt opgestart en die door het telemetriesysteem gevraagd wordt de SPICAM gegevens door te sturen. Daarom dient SPICAM-BE een kommando- en dataverbinding te hebben met SPICAM-S. Inderdaad, SPICAM-BE start de verschillende kanalen, configureert ze en verzamelt hun data zoals dat geprogrammeerd is eensluitend het zo geheten cyclogram van het instrument.

Het configureren van de SPICAM-S kanalen is op zich ook voorgeprogrammeerd. Zodra de satelliet SPICAM-BE opstart, zoekt deze in een inwendige tijdstabel de tijd op die het dichtst de satelliettijd benadert en vindt met die tijd een configuratienummer. In een configuratietabel is met elk configuratienummer dan weer een volledige configuratieset verbonden voor alle SPICAM-S kanalen. Zowel de tijds- als de configuratietabel kunnen herprogrammeerd worden per telekommando. SPICAM-BE wijst aan de vier SPICAM-S kanalen (zonnevolger/afsluitsysteem, infrarood kanaal, ultraviolet en zichtbaar kanaal, controlecamera) sekwentieel een communicatievenster toe van 250 ms. In deze kwart seconde zendt SPICAM-BE de respectievelijke configuraties door, wacht op een boodschap met de bevestiging van ontvangst ("acknowledgement") en de databoederschap. Om zo weinig mogelijk kostbare meettijd te verliezen wordt voor het ultraviolet en zichtbaar kanaal

op deze regel een uitzondering gemaakt. Dit kanaal slaat de gemeten spektra tijdelijk zelf inwendig op en zendt pas na de observatie alle data tezamen naar SPICAM-BE. De wetenschappelijke gegevens van de vier kanalen worden in het interne ringgeheugen van SPICAM-BE opgeslagen en na het afzetten van SPICAM-S naar het telemetriesysteem (MORION) getransfereerd. Van daaruit zal de data op geregelde tijdstippen doorgezonden worden naar de aarde. Op aarde komen de data terecht in een ontvangst- en verwerkingssysteem (Ground Support Equipment). De SPICAM-S gegevens worden uit de datastroom gefilterd en via netwerk op PC's ter beschikking gesteld van de instrumentverantwoordelijken en wetenschappers. Voor elk van de vier kanalen werd een visualisatiesoftware (quick-look) geschreven die de spektra toont voor het infrarood, het ultraviolet en zichtbaar kanaal en de controlecamera en het gedrag van de zonnevolger op het

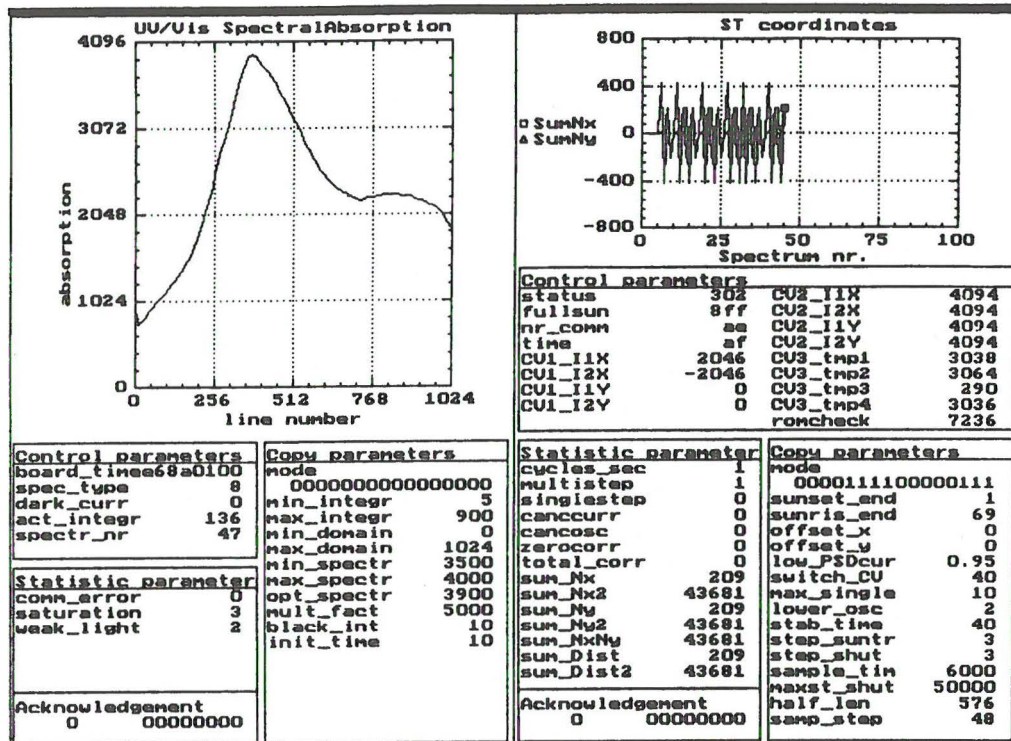


Fig. 3: De resultaten op de "ground support equipment".

scherm brengt doorheen een volledige waarnemingsperiode.

Ontwikkelingsfilosofie

De ontwikkeling van dit ruimteproject gaat hand in hand met de modelfilosofie, die grotendeels wordt opgelegd door de Russische satellietverantwoordelijken aan alle deelnemende teams. De uiteindelijke doelstelling is de levering van een vluchtmodel, de versie van het experiment die op de satelliet zal gemonteerd worden en naar Mars zal vliegen, aan het *Russische Instituut voor Ruimteonderzoek (IKI)*. In dit model zijn alle gebruikte materialen en elektronische componenten ruimtewaardig.

Om na te gaan of het vluchtmodel probleemloos kan geïntegreerd worden op de satelliet, worden een termisch, een structuur- en een elektrisch model aan IKI geleverd, die allen uiterlijk identiek zijn, doch niet ruimtewaardig. Het termisch model simuleert het inwendige vermogenverbruik van het instrument. Om termisch zo goed mogelijk het vluchtmodel te benaderen is het uitgerust met een termisch deken, een radiator, een afsluitsysteem en wordt ook de massaverdeling nagebootst. Op dit model worden testen uitgevoerd in een termisch vacuüm, waarbij de termische interface met de satelliet, naburige instrumenten en de ruimte worden geïmiteerd.

Het structuurmodel simuleert de massaverdeling en het zwaartepunt van het instrument. Het wordt gebruikt bij vibratietesten die mogelijke zwakke punten in het structuurontwerp aan het licht moeten brengen.

Het elektrisch model bevat alle elektrische functies van het instrument. Met dit model worden integratietesten en elektrische interface testen uitgevoerd. Het juist functioneren van het experiment (ontvangen van telekommando's, versturen van gegevens, ...) en het korrekte verloop van een cyclogram (opeenvolging van acties tijdens een waarnemingsperiode) worden geverifieerd, zowel in autonome (SPICAM-S onafhankelijk) als in globale testen (alle instrumenten tezamen).

Voor een aantal Frans-Belgische experimenten heeft het *Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)* de verantwoordelijkheid op zich genomen te zorgen voor hun kwaliteitscontrole en in te staan voor de aanvaardingsprocedure voor levering aan Rusland. De taak bestaat erin genormeerde vibratie-, termische, elektrische en elektro-magnetische compatibiliteitstesten uit te voeren. Daarom wordt een vijfde, ruimtewaardig model ontwikkeld, het kwalificatiemodel. Dit model wordt trouwens ook, na kwalificatie- en aanvaardings-testen, als een reserve voor het vluchtmodel geleverd aan IKI.

Het CNES voert ook kwalificatietesten uit op het elektrisch model (elektrische en EMC-testen) en op het vluchtmodel (gereduceerde testset).

Tenslotte wordt ook een "engineering model" van het instrument ontwikkeld dat functioneel volledig identiek is aan het vluchtmodel, doch niet ruimtewaardig. Het blijft tijdens de hele vluchtvoorbereiding en vlucht ter beschikking van het ontwikkelingsteam en zal o.a. gebruikt worden tijdens kalibratietesten met de echte zon.

Alvorens elk model wordt geassembleerd zullen onderdelen ervan reeds individuele testen ondergaan hebben. Het afsluitsysteem, het zonnevolgingsysteem en de spektrometer kanalen worden vooraf in vibratie en termisch vacuüm uitgetest. Tenslotte worden alle mechanische en elektrische onderdelen geïntegreerd en een volledige optische uitlijning uitgevoerd.

Return voor planeet aarde

Dankzij SPICAM-S krijgt een Belgisch wetenschapsteam de unieke mogelijkheid deel te nemen aan een prestigieus multinationalaal ruimteproject. Dit is des te uitzonderlijk gezien het grootste deel van het instrument volledig ontworpen en ontwikkeld is aan het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie (BIRA).

SPICAM-S zal deel uitmaken van een nieuwe en allesomvattende studie van de planeet Mars. De wetenschappelijke return van de experimenten, en van SPICAM-S in het bijzonder, zal

nieuwe kennis bevatten, niet enkel over Mars zelf, maar onrechtstreeks ook over onze eigen planeet.

Referentielijst

1. Barker, E. S., Detection of Molecular Oxygen in the Martian atmosphere, *Nature*, 238, 447-448, 1972.
2. Barth, C. A. en C. W. Hord, Mariner Ultraviolet spectrometer: Topography and Polar Cap, *Science*, 173, 197-201, 1971.
3. Carleton, N. P. en W. A. Traub, Detection of Molecular Oxygen on Mars, *Science*, 179, 795-796, 1972.
4. Connes, P., J. Connes en J. P. Maillard, Atlas des Spectres Infrarouges de Venus, Mars, Jupiter et Saturne, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1969.
5. Horn, D., J.M. McAfee, A.M. Wimer, K.C. Herr en G.C. Pimental, The Composition of the Martian Atmosphere: Minor Constituents, *Icarus*, 16, 543-556, 1972.
6. Kaplan, L. D., J. Connes en P. Connes, Carbon Monoxide in the Martian Atmosphere, *Astrophys. J.*, 157, L187-L192, 1969.
7. Korablev O. I., M. Ackerman, V.A. Kraznopolsky, V. I. Moroz, C. Muller en A.V. Rodin, Tentative Identification of Formaldehyde in the Martian Atmosphere, *aanvaard voor Planetary SpaceSci.*, 1993.
8. Kremnev, Rogorski en Pitchkadze, Spécification d'Exploitation de Fonctionnement et d'Interfaces des Equipements Scientifiques avec le Véhicule Spatial MARS-94, Moscou, 1989.
9. Kuiper, G.P., Infrared Spectra of Planets, *Astrophys. J.*, 106, 251-254, 1947.
10. Kuiper, G. P., The Atmosphere of the Earth and the Planets, uitgegeven door G. P. Kuiper, University of Chicago Press, Chicago, 1952.
11. Nier A. O., W. B. Hanson, A. Seiff, M. B. McElroy, N. W. Spencer, R.J. Duckett, T. C. D. Knight en W. S. Cook, Composition and Structures of the Martian Atmosphere: Preliminary Results from Viking I, *Science*, 193, 786-788, 1976.
12. Owen, T. en K. Biemann, Composition of the Atmosphere at the Surface of Mars: detection of Ar-36 and Preliminary Analysis, *Science*, 193, 801-803, 1976.
13. Schorn, R.A., C.B. Farmer en S. J. Little, High-Dispersion spectroscopic Studies of Mars, III, Preliminary Results of 1968-1969 Water Vapor Studies, *Icarus*, 11, 283-288, 1969. ■