



De Belgische federale bijdrage aan de JUICE-missie van ESA

David Bolsée

en Lionel Van Laeken

Doel van de JUICE-missie

Het Jupiter-systeem, gevormd door de gasreus en zijn manen, wordt gezien als een soort mini-zonnestelsel. Onder de oceanen van de vier grootste, zogenaamde Galileïsche manen (Ganymedes, Callisto, Europa en Io) bevinden zich waarschijnlijk verborgen biosignaturen die wijzen op het mogelijke bestaan van leven. Jupiter is ook een archetype, toegankelijker voor observatie

dan de meeste exoplaneten die vandaag de dag worden gedetecteerd. Deze vele redenen voor exploratie hebben de Europese Ruimtevaartorganisatie (ESA) ertoe gebracht om in 2012 de JUICE-missie (JUpiter and ICy moons Explorer) te selecteren: een klasse L (Large)-missie die geïntegreerd is in het programma Cosmic Vision 2015-2025 dat het Joviaanse systeem in zijn geheel bestudeert. De lancering is gepland voor september 2022, vanaf de lanceerbasis in Kourou (Frans-Guyana).



© Spacecraft: ESA/ATG medialab; Jupiter: NASA/ESA/J. Nichols (University of Leicester); Ganymede: NASA/JPL; Io: NASA/JPL/University of Arizona; Callisto and Europa: NASA/JPL/DLR

De satelliet zal gelanceerd worden met een Ariane 5-raket en zal een reis van bijna negen jaar moeten voltooien voordat het Jupiter in 2031 zal bereiken. De belangrijkste doelstellingen zijn het bestuderen van de atmosfeer van Jupiter (structuur, dynamiek en samenstelling), de magnetosfeer, het oppervlak (ijs, organische en minerale materie) en de exosferen van de Galileïsche satellieten. De JUICE-ruimtesonde zal uitgerust zijn met 10 instrumenten en een experiment, die elk zijn geselecteerd op hun vermogen om aan de wetenschappelijke doelstellingen van de missie te voldoen.

Het MAJIS-instrument

In deze context blijkt MAJIS (Moons And Jupiter Imaging Spectrometer) een belangrijk instrument te zijn. MAJIS is een hyperspectrale beeldvormer met twee meetkanalen VIS-NIR (zichtbaar en nabij infrarood) en IR (infrarood) die een breed spectraal bereik bestrijken tussen 0,5 μm en 5,54 μm . Het zal vele doelstellingen van de missie als geheel vervullen: de karakterisering van de oppervlakken van de ijsmanen, hun mogelijke geologische en cryo-vulkanische activiteiten, hun exosferen, de atmosfeer van Jupiter, het oppervlak van Io en de kleine satellieten, en de Joviaanse ringen. MAJIS werd ontwikkeld door het Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS, Frankrijk) onder toezicht van het Centre National d'Etudes Spatiales (CNES, Frankrijk) en het Italiaanse ruimtevaartagentschap (ASI).

Inleiding

De JUICE-missie van ESA zal in 2031 van start gaan met een gedetailleerde studie van het Joviaanse systeem met zijn ijsmanen. Het zal trachten antwoorden te vinden over de evolutionaire geschiedenis van het zonnestelsel. Het Frans-Italiaanse MAJIS-instrument zal een belangrijke bijdrage leveren aan deze missie door spectrale beeldgegevens te verzamelen in twee observatiekanalen: VIS-NIR en IR. De ontwikkeling van het instrument heeft geleid tot een sterke betrokkenheid van twee van de federale instituten op het plateau van Ukkel: het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA) en de Koninklijke Sterrenwacht van België (KSB). Hun rol bestond uit de ontwikkeling en de toepassing van een kalibratie-eenheid voor de radiometrische en elektro-optische karakterisering van de vluchtdetector van MAJIS (VIS-NIR-kanaal). Na twee jaar voorbereiding vond de kalibratiecampagne plaats in de zomer van 2020.

De eisen van een ruimtemissie

Het BIRA en de KSB hebben een rijke ervaring in de ontwikkeling en karakterisering van nuttige ladingen voor ruimtevaartprojecten. De onderzoeksdomeinen omvatten bijvoorbeeld zonne-fysica (SOLSPEC-instrumenten, LYRA) en planetologie (SOIR, NOMAD). Dit werk heeft aanleiding gegeven tot talrijke internationale samenwerkingsverbanden. De omstandigheden tijdens een ruimtemissie, zowel wat betreft de plaatsing van een satelliet in een baan rond een hemellichaam als het uitvoeren van metingen in de ruimte, zijn een ware uitdaging. Een optimale verwerking van de signalen die door het instrument tijdens een missie verzameld worden, moet gegarandeerd kunnen worden. Dit is een cruciale stap voor het succes van een ruimtemissie die de omzetting van ruwe signalen in hoogwaardige wetenschappelijke eindgegevens integreert. Bijgevolg moet elk optisch subsysteem, en in het bijzonder een detector - naast omgevingstests zoals vibratietests die de robuustheid van de assemblage aantonen - radiometrisch worden getest en gekarakteriseerd.

Toepassing op het MAJIS-project

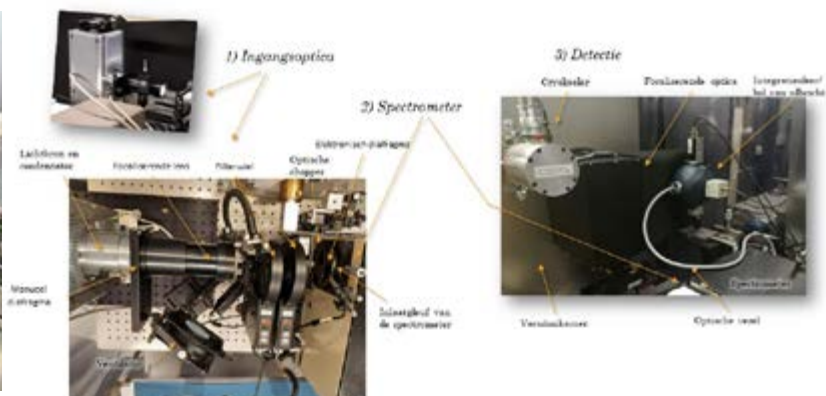
Op basis van hun verworven ervaring werden het BIRA en de KSB via hun teams van ingenieurs en wetenschappers in 2015 door IAS (Frankrijk), initiatiefnemer van het MAJIS-project, gevraagd om bij te dragen aan de karakterisering van de VIS-NIR-detector, die

overeenkomt met een matrixdetector van het bedrijf Teledyne (VS). Deze karakterisering bestudeert de intrinsieke eigenschappen van de detector bij afwezigheid van een lichtstroom, evenals zijn reactie op goed gekarakteriseerde verlichting. Typische eigenschappen zijn onder andere de homogeniteit van de inter-pixel respons, lineariteit, spectrale respons (kwantumefficiëntie), verzadigingsniveau, remanentie en andere eigenschappen van de nabije

elektronica (amplificatie, ruis, offset). Met de steun van BELSPO en ESA was het de bedoeling om in het laboratorium aanzienlijke middelen in te zetten om de vluchtdetector onder vacuüm en bij zeer lage temperatuur te testen. De laboratoria beschikten al over uitstekende radiometrieapparatuur, maar deze werd aangevuld voor het thermisch vacuüm om te voldoen aan de meetkwaliteits- en veiligheidsvereisten voor het MAJIS-project.



Figuur 1: Algemeen zicht op het vacuümvat van de kalibratie-eenheid.



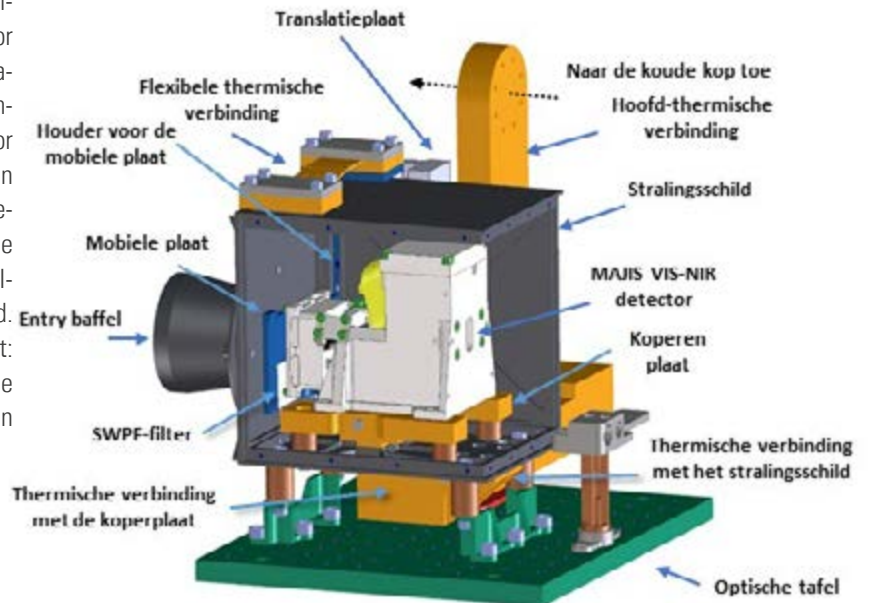
Figuur 2: Opto-mechanische apparatuur van de MAJIS VIS-NIR-kalibratie-eenheid.

Apparatuur, tests en prestaties van de kalibratie-eenheid

De testinstallatie (Figuur 1) werd gemonteerd in de radiometrielaboratoria van het BIRA. De basisuitrusting bestaat uit een vacuümvat, gekoppeld aan een cryostaat die het mogelijk maakt het ruimtevacuüm en de thermische omstandigheden van de JUICE-missie te simuleren. Het te onderzoeken temperatuurbereik voor de MAJIS-detector liep van 125 K tot 144 K (-148 °C tot -129 °C). Het vat is uitgerust met een venster dat wordt gebruikt om de lichtstroom in het vat te sturen wanneer een detector voor zijn karakterisering in het vat is geïntegreerd. De meeste optische apparatuur voor de productie en het transport van licht werd op een optische bank naast de cel gemonteerd (Figuur 2). Omdat het een onderdeel van het vluchtmodel was, werd al deze apparatuur geïnstalleerd in een cleanroom, onder een laminaire stroom, die voldoet aan de hoogste normen van deeltjesreinheid.

Om een uitgebreid testplan uit te voeren, is een stabiele, homogene, monochrome, golflengte-instelbare lichtstroom in het VIS-NIR-bereik nodig, waarvan de intensiteit fijn instelbaar is. Deze configuratie werd gerespecteerd voor het MAJIS-project, waarbij de prestaties voor het spectrale bereik van 0,5 μm tot 2,65 μm werden geoptimaliseerd. De installatie kan echter ook in andere projecten worden geoptimaliseerd naar korte golflengten (UV) of langere golflengten (IR). Het principe bestaat uit het gebruik van een wolframhalogeenlamp als lichtbron, gezien de hoge stabiliteit. Een dubbele monochromator laat de selectie toe van een enkele straal (een enkele golflengte of kleur) die vervolgens wordt overgedragen en ruimtelijk gehomogeniseerd door een optisch vezel gekoppeld aan een integrerende bol, tot aan het venster van het vat. De meeste opto-mechanische componenten voor de configuratie van de lichtbundel (intensiteitsvariatie, sluiters, modulator voor de detectie van NIR-signalen) worden tussen de lamp en de spectrometer geplaatst. Voor de verificatie van de verlichtingskarakteristieken (vooral de stabiliteit) worden verschillende middelen ingezet, met behulp van een aan de lamp gekoppelde radiometer en VIS-NIR-fotodiodes die met de integrerende

sfeer zijn verbonden. Sommige daarvan zijn gekalibreerd in absolute radiometrische eenheden, waardoor het mogelijk is de detector te belichten met een gekalibreerde stroom, wat essentieel is om de kwantumefficiëntie van de detector te bepalen. Merk op dat voor het MAJIS VIS-NIR-project ook speciale optieken zijn ontwikkeld om de detector onder een convergentiehoek (11°) te belichten, zodat de configuratie van de MAJIS VIS-NIR-spectrometer na integratie in de JUICE-satelliet op identieke wijze wordt gereproduceerd. In totaal werden drie configuraties mogelijk gemaakt: met luiken die al dan niet gesloten worden voor de karakterisering bij afwezigheid of aanwezigheid van stroom, en vervolgens onder convergerende stralen.



Figuur 3: De houder is ontworpen voor de karakterisering van de MAJIS VIS-NIR-vluchtmodeldetector, waardoor de veiligheid, de afwezigheid van contaminatie, de lichtstroomconfiguratie en de regeling bij lage temperatuur (tussen 157 °C en -120 °C) gegarandeerd zijn.

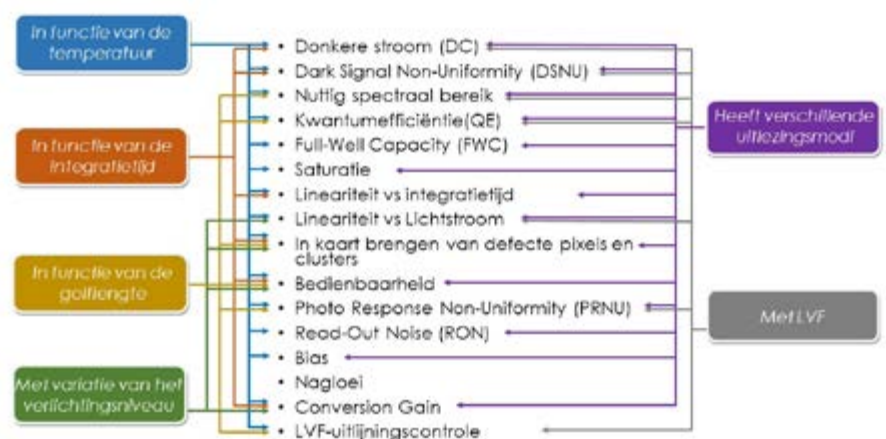
In het vat is een geavanceerde houder (Figuur 3) - verbonden met de cryogene apparatuur - ontworpen om de veiligheid, de afwezigheid van moleculaire contaminatie en stabiele thermische omstandigheden die nodig zijn om de vluchtdetector te karakteriseren, te garanderen. De VIS-NIR-kalibratie-eenheid is geautomatiseerd met behulp van besturingssoftware die onder LabVIEW is ontwikkeld. Ten slotte is een extreem beveiligingssysteem ontwikkeld om te voldoen aan de strenge eisen van CNES en ESA voor het kalibreren van vluchtdetectoren, en zo de integriteit ervan te garanderen. Dit maakt het mogelijk om de risico's van mogelijke storingen van thermische vacuümsoftware en apparatuur op hoog niveau te beheeren. De aldus ontworpen VIS-NIR-kalibratie-eenheid is gevalideerd tijdens de vacuümtests of met behulp van een detector die niet als vluchtmodel is geselecteerd. De kwaliteitscontrole werd gedurende het hele project verzekerd door specialisten van het B.USOC (Belgian User Support and Operations Centre).

Het testplan is samengevat in Figuur 4, waar een specifieke configuratie voor de MAJIS-detector wordt getoond (aanwezigheid van een filter met de naam 'LVF' voor de detector). Dit plan omvat talrijke aanpassingen van de temperatuur, de golflengte van de bundel, het ver-

lichtingsniveau en de specifieke parameters van de detector (leesmodus, integratietijd).

De ontwikkeling van deze kalibratie-eenheid, die onder de verantwoordelijkheid van de radiometrielaboratoria valt, is het resultaat van de samenwerking tussen deze laatste en verschillende afdelingen van het BIRA, voornamelijk de engineeringafdeling. Het is belangrijk om de bijdrage van de KSB op het vlak van de karakterisering van matrixdetectoren te benadrukken. Hun knowhow is in het bijzonder gericht op hun software voor

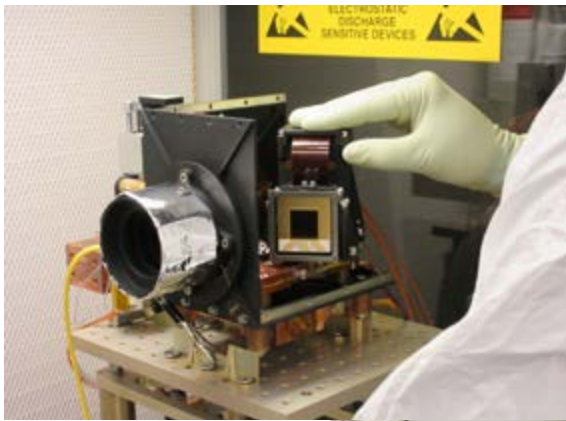
de verwerking van karakteriseringsgegevens, die hier is aangepast voor het MAJIS-project. Tot slot is het belangrijk om de duurzaamheid van de investering in een dergelijke laboratoriuminfrastructuur te benadrukken. Deze eenheid zal volledig operationeel blijven en zal kunnen bijdragen aan het testen van andere nuttige ladingen, zoals subsystemen of een instrument als geheel, in het kader van andere ruimtevaartprojecten. Daarnaast blijft het team dat verantwoordelijk is voor het laboratorium en haar deskundigheid bewezen heeft, in dienst.



Figuur 4: Samenvatting van het testplan

De bijdrage van het Centre Spatial de Liège

Er moet benadrukt worden dat het Centre Spatial de Liège (CSL) een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan de ontwikkeling van MAJIS, door het testen van prototypedetectors die zijn blootgesteld aan hoogenergetische stralen. Dit is belangrijk, want Jupiter heeft een magnetosfeer. De oorsprong van het magnetisch veld is identiek aan die van de aarde, maar het is veel intensiever. De Joviaanse magnetosfeer is daarom zeer rijk aan zware ionen en protonen, vandaar de noodzaak om ruimte-instrumentatie te ontwikkelen die robuust is tegen straling. De MAJIS-detectors moeten inderdaad bestand zijn tegen interacties met deeltjes en de prestatieafbraak beperken. Dit moet voor de vlucht worden getest en gekarakteriseerd.



Figuur 6: De MAJIS VIS-NIR-detector tijdens de integratie in de vacuümkamer voor de karakteriseringscampagne.

Waarnemingscampagne van de MAJIS VIS-NIR

Na een strikt testschema, een laatste reeks validatietests en na integratie van de detector (Figuur 5 en Figuur 6) is de karakteriseringscampagne van de VIS-NIR-vluchtmodeldetector eind juni 2020 van start gegaan. Alle prestaties werden geanalyseerd tijdens een testperiode van meerdere weken. Na de gegevensverwerking door het Institut d'Astrophysique Spatiale werd de detector gevalideerd voor de MAJIS/JUICE-missie. Een tweede campagne vond plaats in augustus, waarbij de focus lag op de detector in zijn vluchtconfiguratie, d.w.z. met de LVF-filter voor het ontvangstoppervlak en met een convergerende lichtbundel. Door de bevestiging van de prestaties, in combinatie met de verificatie van de uitlijning van deze filter, kon de campagne met succes worden afgerond. Wanneer men alle verwachtingen

Figuur 5: De MAJIS VIS-NIR vluchtmodeldetector wordt voorbereid voor integratie in de vacuümkamer voor volledige elektro-optische karakterisering in een vacuümthermische omgeving.



van de Europese wetenschappers beschouwt voor de studie van het Joviaanse systeem, die dankzij de toekomstige prestaties van het MAJIS-instrument (ongeveer evenaard door andere sondes die Jupiter al hebben verkend) zal worden uitgevoerd, begrijpt men het belang van het werk dat op het plateau van Ukkel wordt uitgevoerd. Een laatste campagne, die in mei 2021 plaatsvond, maakte het mogelijk om de reservedetector van het MAJIS-instrument te karakteriseren. In de veronderstelling dat er zich geen probleem zal voordoen met het vluchtmodel, zal deze detector voor deze missie niet gebruikt worden.

De auteurs

- **David Bolsée** is doctor in ingenieurswetenschappen en verantwoordelijk voor de onderzoeksgroep van het BIRA die gericht is op het meten van zonnestraling en de radiometrische karakterisering in laboratorium.
- **Lionel Van Laeken** is ingenieur in lucht- en ruimtevaart en heeft bijgedragen aan de ontwikkeling van de kalibratie-eenheid voor de MAJIS VIS-NIR-detector.

Het MAJIS VIS-NIR-team van het BIRA en de KSB

- Bij het BIRA: David Bolsée, Ann Carine Vandaele, Miriam Cisneros, Nuno Pereira, Lionel Van Laeken, Cédric Depiesse, Séverine Robert, Lars Jacobs en het bijhorend technisch personeel, Claudio Queirolo en Michel Kruglanski (B.USOC), en voor het BIRA tevens de ad-hocondersteuning van de IT-, engineering-, administratieve, communicatie- en infrastructuur-departementen.
- Bij de KSB: Özgür Karatekin en Samuel Gissot.

Dankwoord

De ontwikkelingen gerealiseerd door het BIRA en de KSB ter ondersteuning van de MAJIS/JUICE-missie werden gefinancierd door het Federaal Wetenschapsbeleid (BELSPO), via het JUICE-project van ESA in het kader van het PRODEX-programma (PEA 4000124255) en via het Fonds de la recherche scientifique (FNRS), beurs 34828772. We willen vooral de deskundigen van het IAS, CNES en ESA bedanken voor de waardevolle ondersteuning bij de ontwikkeling van de kalibratie-eenheid.

Conclusies

De efficiënte samenwerking tussen de twee federale wetenschappelijke instellingen, het BIRA en de KSB, heeft het mogelijk gemaakt om met succes te voldoen aan de vraag van het wetenschappelijk en technisch MAJIS-team van het Institut d'Astrophysique Spatiale (Frankrijk), met de steun van BELSPO en ESA. Een karakteriseringscampagne, van groot belang voor het succes van de MAJIS/JUICE-missie, heeft de validatie van de VIS-NIR-vluchtmodeldetector mogelijk gemaakt. De bij het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie geassembleerde kalibratie-eenheid blijft operationeel en kan door haar flexibiliteit bijdragen tot de karakterisering voor andere ruimtevaartprojecten in de toekomst.