

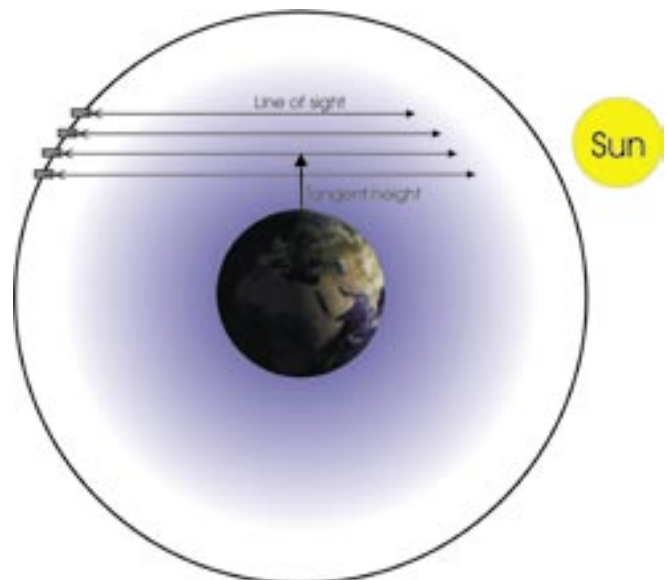
Sterren jagen om nieuwe

Iedereen weet intuïtief wat onze atmosfeer of dampkring is: het gasvormige omhulsel van de aardbol, opgebouwd uit een aantal lagen, waarvan de dichtheid geleidelijk afneemt met de hoogte, met een factor 5 per 10 km. De atmosferische lucht die we inademen bestaat grotendeels uit stikstof en zuurstof. Verder vinden we in de atmosfeer een reeks minoritaire of spoorgasen die, ondanks de minuscule hoeveelheden waarin ze voorkomen, de zonnestraling sterk kunnen beïnvloeden. Stratosferische ozon (op een hoogte van 15 tot 45 km) is de bekendste vorm van deze spoorgasen en heeft de eigenschap ultraviolette straling sterk te absorberen, wat onontbeerlijk is om de integriteit van het genetisch erfgoed van levende wezens in stand te houden.

Vaak stelt men zich de vraag hoe deze spoorgasen gemeten worden. Willen we binnen afzienbare tijd over meetgegevens op wereldschaal beschikken, dan moeten we deze spoorgasen vanuit de ruimte meten. Van de beschikbare waarnemingstechnieken is *remote sounding* door sterrenocculatie zonder twijfel de elegantste. Ondanks de ingewikkelde naam is dit een bijzonder eenvoudige techniek, die snel door iedereen te begrijpen is. Op het middaguur kan men niet met het blote oog naar de zon kijken. Enkele uren later daarentegen, kunnen we probleemloos het avondrood van de zonsondergang bewonderen... Hieruit volgen twee conclusies:

- 's Avonds is de schijnbare lichtsterkte kleiner dan op het middaguur, wat voor de hand ligt aangezien het licht bij een lage zonnestand een langere weg door de atmosfeer heeft afgelegd. Met andere woorden, door de variatie van de lichtsterkte tijdens de dag te meten, verkrijgen we bepaalde gegevens over de lichtabsorberende gaskolom en de schijnbare toename ervan naarmate het hemellichaam dichterbij de horizon komt.
- Hierbij dienen we een tweede kanttekening te plaatsen: de ondergaande zon is rood, en niet geel zoals wanneer de zon de meridiaan passeert! Dit verschijnsel, avondrood genoemd, is te verklaren door het feit dat het blauwe licht uit het spectrum van het zonlicht het sterkst door zwevende deeltjes (in casu luchtmoleculen) wordt verstrooid, en het rode licht het minst. Resultaat van deze lichtverstrooiing: de gaskolom verwijdert geleidelijk de blauwe, groene en gele componenten van de invallende zonnestraling, zodat het oog alleen de rode component van het zonnenspectrum waarneemt. Door het 'verval' van de lichtsterkte van het hemellichaam waar te nemen, krijgen we bijgevolg meer informatie over de aard en dikte van de dampkring.

De efficiëntie waarmee het licht wordt verwijderd als functie van de golflengte (kleur) van de straling varieert bovendien niet altijd geleidelijk. Bepaalde moleculen absorberen de straling binnen een smal golflengtegebied: deze geabsorbeerde golflengte is terug te vinden in de zogeheten absorptielijn waarvan de 'diepte' een maat is voor de hoeveelheid gas tussen ons oog en de grensgebieden van de dampkring. Vermenigvuldigen we deze hoe-



Tijdens de occultatie worden verschillende metingen gedaan op verschillende tangentiële hoogten om de atmosferische samenstelling te bepalen.

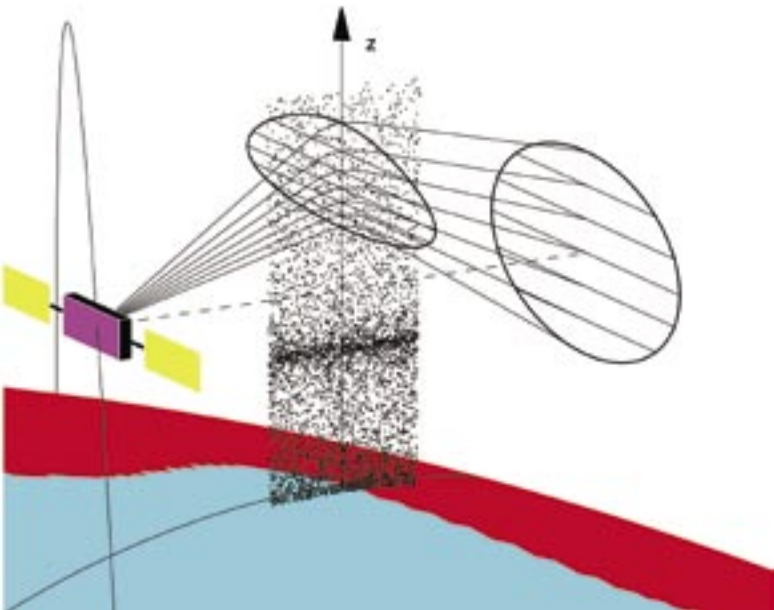
veelheid met het (in een laboratorium gemeten) lichtabsorberende vermogen van het gas, dan krijgen we de optische dikte voor de desbetreffende golflengte.

We beschikken nu over alle gegevens om deze methode vanuit de ruimte toe te passen. Hierbij observeren we de zon door middel van een spectrometer, een instrument dat de lichtsterkte op verschillende nuttige golflengten meet. Naarmate het instrument de eclips nadert, dat wil zeggen het gedeelte van de aardbol waar het nacht is, komt de gezichtslijn die de tangentiële hoogte bepaalt, dichterbij het aardoppervlak: in dit geval krijgen we een orbitale zonsondergang te zien, ook occultatie genoemd. Technisch gezien biedt deze methode een voordeel van onschatbare waarde. In een ruimteomgeving worden de meetinstrumenten immers zeer sterk beproefd: veroudering van sensoren, vertroebeling van de optica, storende achtergrondruis... Dit maakt een vergelijking met een lichtbron waarvan de lichtintensiteit gekend is, bijzonder moeilijk. Gelukkig is de occultatietechniek zelfkalibre-

sterren te creëren

rend. We hoeven alleen de zon buiten de atmosfeer waar te nemen en de volgende metingen daaraan te relateren naarmate de tangentiële hoogte afneemt: de verhouding tussen deze intensiteitwaarden is de atmosferische transmittantie die een directe aanwijzing is voor de gezochte optische dikte. Voeren we slechts één meting op een specifieke tangentiële hoogte uit, dan krijgen we vanzelfsprekend alleen de optische dikte langs dit optische traject. Indien we echter de meting tijdens de occultatie herhalen dan verkrijgen we de optische dikte op andere tangentiële hoogten. Die komen overeen met verschillende optische trajecten die dezelfde atmosferelagen onder verschillende hoeken snijden. Door de meetgegevens digitaal te verwerken op basis van een wiskundige methode, inversie genoemd, krijgen we de hoeveelheid gas in elke laag.

Het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA) heeft in 1992 de spectrometer ORA (*Occultation RAdiometer*)



aan boord van de Europese satelliet EURECA geplaatst. Deze spectrometer heeft gedurende 9 maanden meer dan 6000 occultaties van de zon gemeten. Hoewel het inversieproces bemoeilijkt werd door de combinatie van verschillende tangentiële hoogten in de waarneming van de volledige zonnenschijf, was het experiment ORA een succes dat bekroond werd door talloze wetenschappelijke publicaties. Dankzij ORA werd het mogelijk de uitstoot van vulkanische aerosolen veroorzaakt door de Pinatubo-uitbarsting te meten en het tweede ozonmaximum in de mesosfeer op een hoogte van ca. 90 km klimatologisch in kaart te brengen.

Het ORA-experiment observeerde de ganse zonnenschijf, verplaatst en samengedrukt door atmosferische refractie.

Op internationaal vlak heeft een tiental meetinstrumenten op basis van de occultatietechniek het mogelijk gemaakt de evolutie van belangrijke spoorgassen zoals ozon, stikstofdioxide, waterdamp e.d. te volgen. Het BIRA staat hoog aangeschreven voor zijn kennis op dat gebied en is om die reden lid van het *Solar Occultation Science Team* van NASA.

De occultatietechniek heeft echter ook beperkingen! Zo bedraagt de periode van de satellietbaan op een hoogte van 800 km bijvoorbeeld 100 minuten, zodat er slechts een dertigtal occultaties (zonsopgang en -ondergang) per dag mogelijk zijn. Gezien de geringe zonsbeweging bij elke aswenteling van de aarde blijft de breedtegraad van het tangentiële punt vrijwel constant, terwijl de lengtegraad zich ca. 25 graden verplaatst heeft. Afhankelijk van de helling van het baanvlak zijn er minstens twee maanden nodig om het volledige aardoppervlak te bestrijken. Dit tijdvenster is te groot in vergelijking met de temporele resolutie van de modellen voor chemisch transport in de atmosfeer.

Hoe kan de bemonsteringsfrequentie van de aardatmosfeer verbeterd worden? Het observeren van de maan en de planeten kan hier enig soelaas bieden. Het ligt echter voor de hand dat de sterren zich hiervoor het best lenen, niet het minst door hun alomtegenwoordigheid in alle richtingen. Op elk ogenblik tijdens de omwenteling van de satelliet zijn tientallen heldere sterren zichtbaar: dit is de techniek van de sterbedekking of sterrenoccultatie.

De Europese Ruimtevaartorganisatie ESA heeft in 1988 een oproep tot het indienen van voorstellen gedaan om een spectrometer te ontwikkelen en te installeren op ENVISAT, het grootste wetenschappelijke ruimtetuig dat ooit door Europa werd gebouwd. In samenwerking met Franse partners van de *Service d'Aéronomie* van het CNRS, en Finse partners van het *Finnish Meteorological Institute*, heeft het BIRA het ambitieuze project opgezet om een



Het instrument GOMOS en zijn voornaamste ingangspiegel.

Het doublet van mesosferisch natrium, voor het eerst gemeten met de occultatietechniek. Let op de lage optische dichtheid (0.003).

sterspectrometer te ontwikkelen die de ontwikkeling van de ozonlaag in de tijd wereldwijd in kaart brengt. Dit project kreeg de naam *Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars*. GOMOS was geboren!

In de daaropvolgende jaren verrichtten alle partners heel wat voorbereidings- en denkwerk naar de beste inversiealgoritmen die in staat zijn om geofysische informatie af te leiden van de occultatie van alomtegenwoordige sterren met een perfecte verticale resolutie langs de gezichtslijn, maar ook van sterren met een kleine lichtkracht (helderheid) die moeilijker op te sporen zijn.

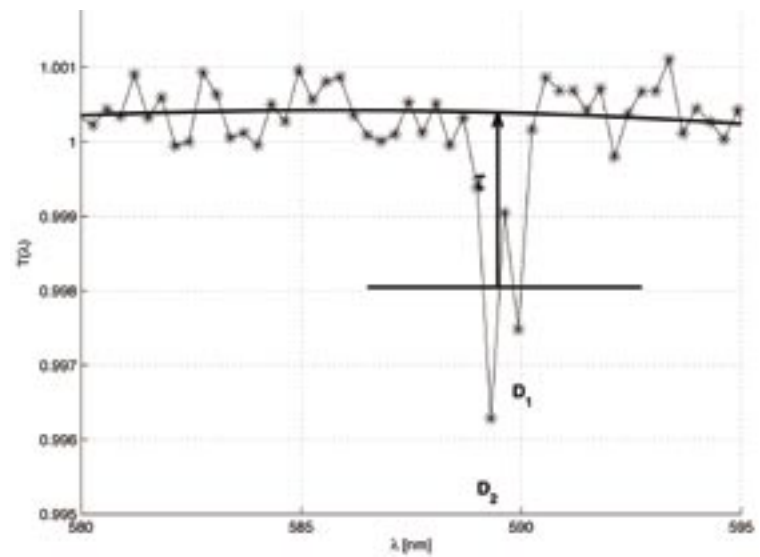
Bovendien moesten alle betrokkenen heel wat geduld uitoefenen als gevolg van de vertraagde lancering van ENVISAT en zijn draagraket Ariane 5. GOMOS werd uiteindelijk operationeel op 1 maart 2002, 14 jaar na het opstarten van het project. De missie die het GOMOS-instrument meekreeg, is kolossaal: ongeveer een miljoen sterrenoccultaties meten gedurende de verwachte levensduur van 4 jaar.

Zoals alle andere ruimte-experimenten kreeg ook GOMOS tegenslagen te verwerken: minder gevoelige sensoren dan verwacht, voortijdige slijtage van het richtmechanisme, waardoor in allerijl op het noodstelsel moest worden overgeschakeld... en andere incidenten. Zo vreesde men in januari 2005 nog dat het GOMOS-instrument ter ziele was gegaan, toen het zich niet op de gekozen sterren richtte. Maar dankzij het volhardingsvermogen van de ingenieurs kwam er terug hoop: zij bliezen in augustus het instrument nieuw leven in met een softwarepatch.

Ons team heeft al vier jaar een omvangrijke opdracht: al deze meetgegevens analyseren, valideren, verbeteren en interpreteren, met de hulp van onze partners in Parijs en Helsinki. Deze activiteiten hebben reeds publicaties opgeleverd in talloze toonaangevende internationale tijdschriften: ze handelen niet alleen over ozon, maar ook over di- en tristikstofoxides, stratosferische aerosolen, polaire wolken die verantwoordelijk zijn voor het gat in de ozonlaag en talloze andere stoffen die het bestek van dit artikel te buiten gaan.

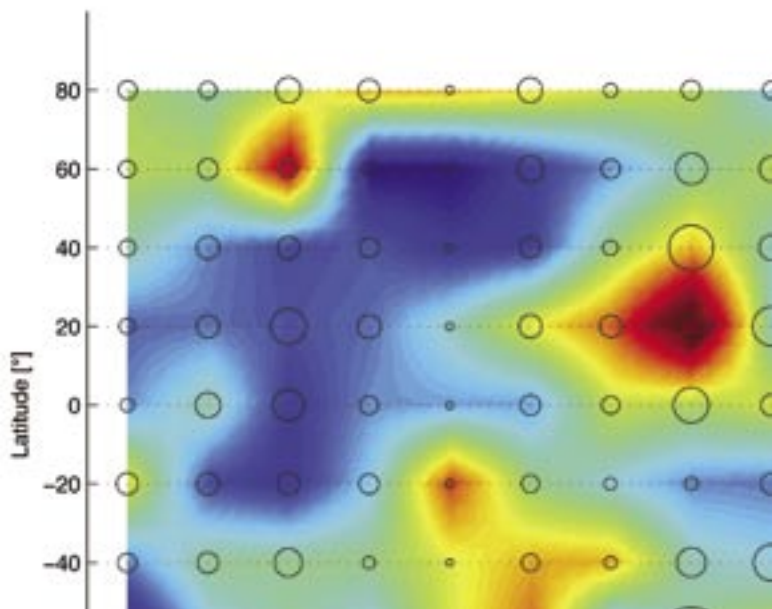
Voor een experiment van het formaat van GOMOS (200 000 000 euro) is elk 'nattevingerwerk' uit den boze. Dit neemt niet weg dat het wetenschappelijk onderzoek tot op zekere hoogte onvoorspelbaar is. Het volgende voorbeeld is tekenend voor ons instrument...

Iedereen is vertrouwd met het fonkelen van sterren. Deze scintillatie wordt veroorzaakt door de snelle microverplaatsing van sterrenstralen, willekeurig gespreid rond een middenpositie. De microverplaatsing is toe te schrijven aan turbulenties in de atmosfeer en is vergelijkbaar met het troebele beeld boven een vlam. GOMOS is uitgerust met een snelle fotometer die deze schijnbare variaties



in de lichtkracht van de ster volgt om de invloed op de gemeten transmittantie te corrigeren. Voor bepaalde observatiegeometrieën is deze correctie echter ontoereikend. Ons team heeft het eenvoudige idee gehad om een groot aantal spectra die binnen de tijd- en breedtegraadvensters worden gemeten, op te tellen: bedoeling hiervan was het vergroten van de signaalsterkte ten opzichte van de ruis en het elimineren van de resterende scintillatie. Tot onze grote verrassing hebben we vastgesteld dat in een atmosfeerlaag van de mesosfeer (op ca. 85 km hoogte) twee uiterst kleine absorptielijnen zichtbaar waren bij een golflengte van ongeveer 590 nanometer. De identificatie van deze absorptielijnen was eenvoudig: het betrof een absorptie door natriumatomen op precies dezelfde golflengte als die waarop de natriumlampen langs onze snelwegen een oranje licht uitstralen...

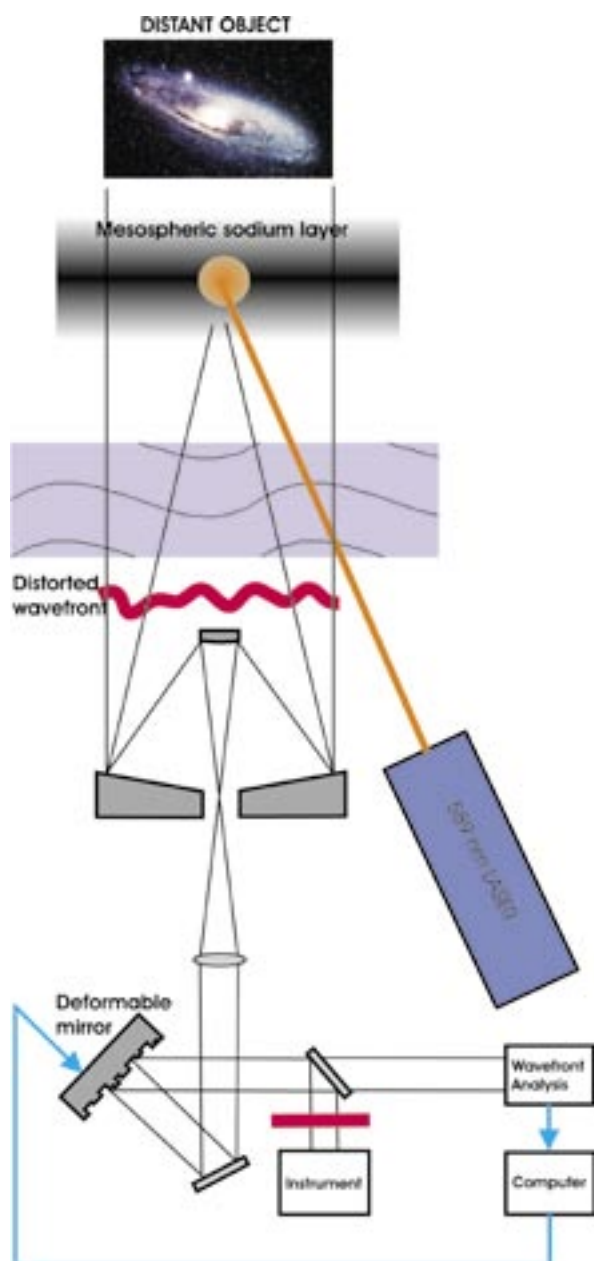
Deze natriumlaag in de mesosfeer vormt het overduidelijke bewijs dat elke dag tientallen tonnen natriumrijke meteorieten de aardatmosfeer binnendringen en verdampen (vallende sterren). Deze relatief verafgelegen atmosfeerlaag is ogenschijnlijk niets meer dan een curiosum voor een beperkte groep onderzoekers die zich met de geochemie van het zonnestelsel bezighoudt. Uitgerekend onze collega-astronomen hebben een onverwachte waarde toegekend aan de natriumlaag tijdens hun onderzoek naar verafgelegen objecten in de ruimte. Voor de grote aardtelescopie is de atmosferische turbulentie een aanzienlijk probleem dat niet opgelost kan worden door de telescoopdiameter te vergroten, het golffront van de inkomende straling is grillig, terwijl dit vlak zou moeten zijn. Dit golffront kan echter snel in de telescoop worden geanalyseerd, zodat men het scintillatie-effect efficiënt kan corrigeren met krachtige computers en een sturing van de ogenblikkelijke spiegelverbuiging: de zogenaamde adaptieve optica. Helaas verzenden verafgelegen objecten onvoldoende fotonen om deze correctie uit te voeren. Bijgevolg is vlak naast het te observeren object een heldere referentiester nodig. De scintillatie van deze referentiester wordt geanalyseerd en op het verafgelegen object wordt dezelfde correctie toegepast. Het hemelgewelf is jammer genoeg onmetelijk groot en er zijn weinig sterren die voldoende lichtkracht hebben om als referentie gebruikt te worden. Dit probleem kan echter omzeild worden door... een kunstmatige ster te maken! Dat gebeurt als volgt. Een laserbundel die op de golflengte van de natri-



De allereerste, nooit eerder geproduceerde wereldkaart van de mesospherische natriumkolom (uitgedrukt in atomen per cm^3 , in de richting van het zenit).

umovergang is afgestemd stuurt een krachtige impuls naar het zenit. Op een hoogte van 85 km worden de fotonen geabsorbeerd door de atomen en opnieuw naar beneden gestuurd. Het door de turbulentie verstoorte golffront kan bijgevolg in elk hemelpunt worden geanalyseerd, zodat de correctie voor de adaptieve optica kan worden toegepast. Tot dusver konden alleen enkele gespreide laboratoria de dichtheid van de natriumlaag meten. Dankzij de resultaten van het GOMOS-experiment heeft ons team onlangs de eerste wereldkaart opgesteld voor de natriumlaag in de mesosfeer, een sympathiek huwelijk tussen zuiver onderzoek naar de samenstelling van de mesosfeer, met toegepast onderzoek waarbij bestaande sterren worden gebruikt om andere sterren te creëren...

Didier Fussen



Een kunstmatige en puntvormige lichtbron in de mesosfeer kan dienen als virtuele ster om de atmosferische turbulentie, die de accurate waarneming van verre voorwerpen verstoort, te corrigeren.

Meer

De GOMOS-missie:
envisat.esa.int/instruments/tour-index/gomos/

D.Fussen et al., Global measurement of the mesospheric sodium layer by the star occultation instrument GOMOS, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L24110, doi:10.1029/2004GL021618, 2004

Loopbaan

1983 Proefschrift over de fysica van atoombotsingen (UCL)

1988 Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie.
 Geaggregeerde werkleider sinds 1998 en houder van een leeropdracht bij de UCL.



Het GOMOS-team met van links naar rechts: Filip Vanhellemont, Nina Matshvili, Jan Dodion, Christine Bingen, Didier Fussen.