

De OMI Spectrometer

C. Smorenburg
TNO-TPD te Delft

Inleiding

De laatste jaren staat in toenemende mate het onderzoek van de atmosfeer in de belangstelling. Hiertoe worden er wereldwijd (met name in Amerika, Japan en Europa) instrumenten ontwikkeld, waarmee vanuit de ruimte de concentratie van ozon en andere bestanddelen van de atmosfeer gemeten kan worden.

Ook Nederland speelt hier een duidelijke rol in. Te noemen valt hier de bijdrage aan de ontwikkeling van SCIAMACHY (= Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography) en GOME (= Global Ozone Monitoring Experiment). Deze instrumenten maken gebruik van lineaire detector arrays met inherent een klein gezichtsveld. Om per omwenteling om de aarde over een redelijk gezichtsveld metingen te kunnen verrichten is het gebruik van een scanspiegel noodzakelijk.

Sinds 1994 wordt een nieuw type instrument voor o.a. ozon metingen ontwikkeld, genaamd OMI (= Ozone Monitoring Instrument), ook vaak met IMS (= Imaging Spectrometer) aangeduid. Het principe van een imaging spectrometer berust op de toepassing van een 2 dimensionale detector array, waarop in één richting een (linear) gezichtsveld wordt afgebeeld en waarop in loodrechte richting de spectrale afbeelding plaats vindt. De ontwikkeling van OMI vindt plaats door een consortium, dat bestaat uit Fokker Space (prime contractor), VTT in Finland (detector front end elektronica), Finnyards (signaal verwerking en digitale elektronica) en TNO-TPD (spectrometer). De ontwikkeling bevindt zich in het fase B stadium d.w.z. gedetailleerd ontwerp en analyse en breadboarding van kritische onderdelen vindt momenteel plaats. In dit ver-

haal wordt het hart van het instrument n.l. de spectrometer nader besproken.

Uitgangspunten

De belangrijkste uitgangspunten voor het optische ontwerp zijn:

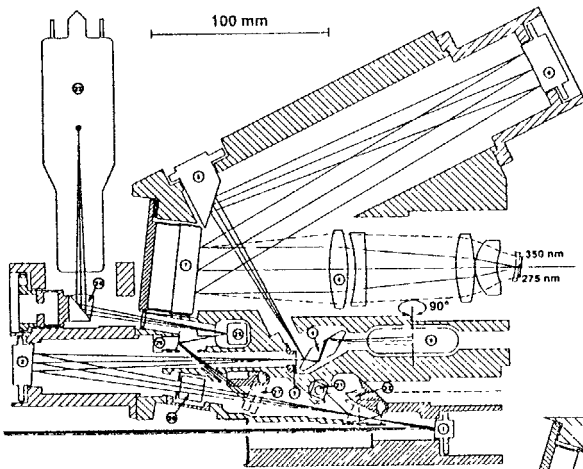
- Gezichtsveld. $2 \times 50^\circ$ (!)
De waarneemrichting is loodrecht naar beneden (nadir), dus er worden metingen verricht over een strookbreedte van 2200 km
- Ruimtelijke resolutie: ca. 40×40 km
Dit wordt bereikt door "co-adding" van 8 detector pixels over het gezichtsveld en een integratietijd van 5 sec. in vlieg-richting
- Spectraal gebied en resolutie
Er zijn 3 spectrale gebieden gedefinieerd
 1. 275 - 310 nm, $\Delta \lambda = 0.3$ nm.
 2. 430 - 560 nm, $\Delta \lambda = 0.4$ nm
 3. 630 - 780 nm, $\Delta \lambda = 0.4$ nm
- Radiometrische nauwkeurigheid: $< 2\%$
Om dit te kunnen bereiken is nodig:
 - Nauwkeurige calibratie in de ruimte
 - Ongevoeligheid of correctie voor de polarisatie van de opvallende straling.

Er zijn uiteraard ook specificaties m.b.t. het minimale signaal / ruisniveau. Vooral voor het UV kanaal is dit een punt van aandacht. De relatieve opening bij dit kanaal moet groter dan $F/2.5$ zijn.

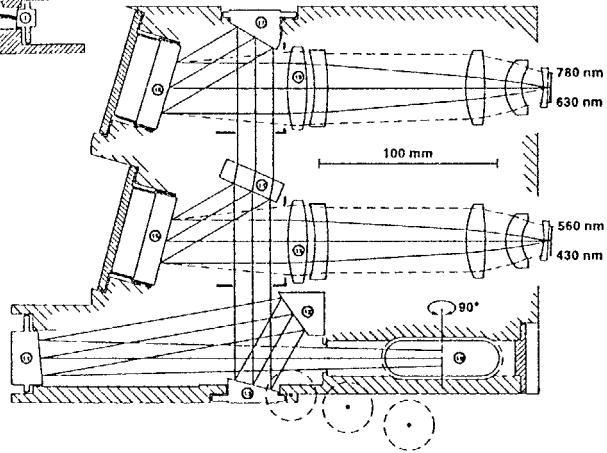
Het optisch systeem

De configuratie van OMI is weergegeven in fig.1

De voornaamste onderdelen van het systeem zijn: een spiegeltelescoop met een groot gezichtsveld en een spectrometer met 3 spectrale kanalen. Daarnaast



Figuur 1a
Spectrometer schema niveau 1



Figuur 1b
Spectrometer schema niveau 2

is OMI voorzien van een z g polarisatie scrambler, een mogelijkheid voor radiometrische calibratie op de zon en een hollow cathode lamp voor golflengte calibratie Met verwijzing naar fig 1 wordt het systeem nader uitgelegd

De telescoop:

De telescoop bestaat uit 2 sferische spiegels (1) en (2) Hiermee wordt een gezichtsveld van 100° omgezet in een (lineair) beeld ter plaatse van de intreespleet (3) van de spectrometer De configuratie is telecentrisch d w z. de bundels in de beeldruimte staan loodrecht op het beeldvlak. De relatieve opening van de telescoop is $f/15 \times F/10$, de afmeting van de intreespleet is $39 \times 0,25 \text{ mm}^2$

Op het bijzondere telescoop ontwerp is door de TPD patent aangevraagd

De spectrometer.

Achter de intreespleet van de spectrometer wordt de straling van het UV kanaal door een prisma met een dichroïtische coating op het voorvlak (4) gereflecteerd. Via vouwspiegel (5) wordt de bundel gecollimeerd met een concave spiegel (6)

De evenwijdige bundel wordt door een 2400 gr/mm tralie (7) gedispergeerd en door een speciaal geoptimaliseerde Petzval configuratie (8) op het detector oppervlak afgebeeld De relatieve opening van de bundel bij het detectoroppervlak is $F/2.4 \times F/2$ Het gebruikte oppervlak van de detector is $7.8 \times 11.3 \text{ mm}$

De straling van kanaal 2 en 3 worden door het dichroïtische oppervlak (4) doorgelaten en door 2 vlakke spiegels (9) en (10) (zie

fig.1b) naar een ander niveau gereflecteerd. Hierna wordt de bundel weer gecollimeerd (door spiegel 11).

Deze evenwijdige bundel wordt opgevoerd door 2 vlakke spiegels (12) en (13), waarna een dichroïtische component (14) de straling van kanaal 2 naar een 1500 gr/mm vlak tralie (15) reflecteert. Ook hier wordt de gedispergeerde straling door een geoptimaliseerde Petzval objectief (16) op de detector afgebeeld.

Tenslotte wordt de straling van kanaal 3 doorgelaten door de dichroïtische component (14) en via een vlakke spiegel (17), een 1350 gr/mm tralie (18) en een Petzval objectief (19) op de derde detector afgebeeld.

Het optisch principe van de OMI spectrometer n.l. het collimeren van de intredende bundel, het scheiden van de straling voor de spectrale kanalen d m v. dichroïtische bundelsplitters, het gebruik van vlakke tralies en afbeelding met een Petzval objectief komt men ook tegen bij SCIAMACHY en GOME.

Voor het ontwerp van de spectrometer waren de volgende punten belangrijk:

- Kleine, compacte configuratie
- Plaatsing van de detectoren aan één kant.
- Zeer efficiënte optiek van het UV kanaal (zo min mogelijk componenten)
- Goede pupil afbeelding om de afmeting van componenten redelijk te houden. Daarnaast is veel inspanning gaan zitten in ontwerp en optimalisatie van de Petzval optiek. Hierbij moest aandacht besteed worden aan de vereiste beeldkwaliteit (afmeting detector pixel is $22,5 \times 22,5 \mu\text{m}^2$), de vertekening en spookbeelden, die veroorzaakt worden door aan het detector oppervlak gereflecteerde straling.

De polarisatie scrambler

Nabij de apertuurstop van de telescoop is een z.g. polarisatie scrambler (20) geplaatst. Deze scrambler bestaat uit verschillende wiggen van dubbelbrekend kwarts.

De werking ervan is vrij complex: het komt er in essentie op neer, dat de polarisatietoestand van de binnenkomende straling bij passage door de wiggen een plaatsafhankelijke verandering ondergaat. Hierdoor zijn achter de scrambler alle mogelijke polarisatie toestanden in een bundel aanwezig waardoor de polarisatie eigenschappen van de resterende optiek bij detectie uitgemiddeld worden. De mate van depolarisatie kan men beïnvloeden door keuze van het aantal wiggen, de grootte van de wighoek en de oriëntatie van de optische assen in de wiggen.

Van de scrambler is een breadboard gemaakt bestaande uit 4 wiggen met een tophoek van 8° . Metingen met lineair gepolariseerd opvallende straling toonde aan, dat na passage een respolarisatie van minder dan 2% optrad.

Voor het definitieve ontwerp wordt de scrambler nog verder geoptimaliseerd.

Calibratie

OMI is uitgerust met een tweetal calibratie mogelijkheden.

1. Absolute radiometrische calibratie
Via componenten (21) en (22) is het mogelijk zonnestraling het systeem in te "spiegelen". Component (21) bestaat uit een aantal diffusoren (3 à 4), die bij de positie van de zon in het z.g. subsolar point zonnestraling kunnen opvangen. Tijdens calibratie bevindt zich één diffusor in de bundel, de andere diffusoren zijn dan beschermd tegen straling.

Component (22) bestaat uit een mechanisch deel, dat normaal de opening voor de zonscalibratie afsluit en een vlakke spiegel, waarmee straling, afkomstig van de diffusor in het optisch systeem van OMI gebracht kan worden.

De aanwezigheid van een aantal diffusoren leidt tot redundantie in calibratie mogelijkheden, omdat hiermee kruiscalibratie tussen (veelvuldig) afgeschermden en normaal gebruikte diffusoren mogelijk is.

2 Golfengte calibratie.

OMI bevat een z g hollow cathode lamp (23), die voor calibratie van de 3 kanalen een aantal smalle spectrale emissie lijnen uitzendt. Via de optische componenten (24), (25), (26) en de aan een mechanische gekoppelde vlakke spiegel (27) wordt deze straling in de optische lichtweg gebracht

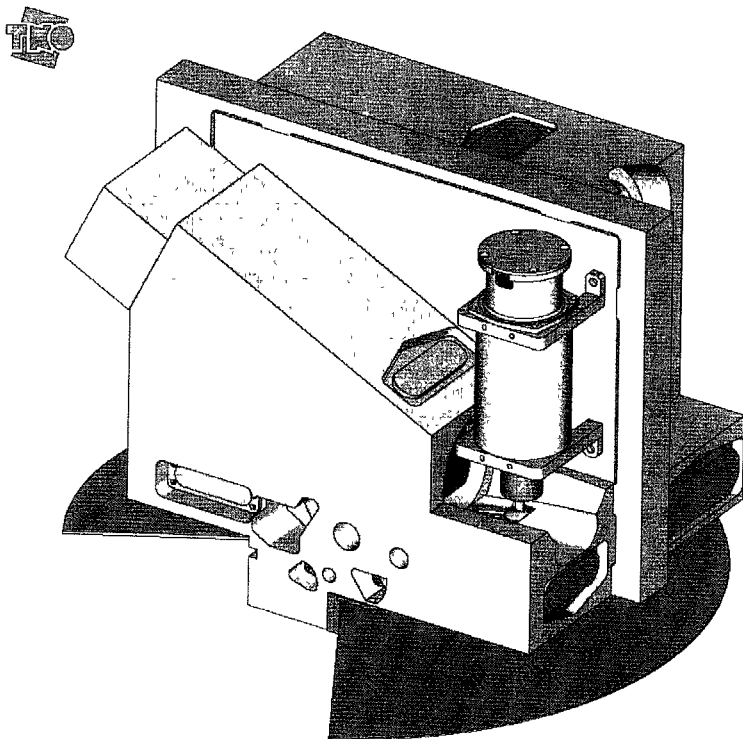
De kwaliteit van OMI

De optische configuratie van OMI is geoptimaliseerd en in detail doorgerekend om te bepalen of de afbeeldingskwaliteit, efficiency, etc. voldoen aan de specificaties. Bovendien is van de speciale telescoop

een breadboard gemaakt, waaraan in het optisch laboratorium metingen verricht zijn.

– Telescoop

De telescoop bestaat uit een off-axis configuratie van 2 spiegels. Daardoor wordt het lineaire gezichtsveld van 100° in het brandvlak afgebeeld op een gebogen lijn. De afwijking t o v een rechte lijn is 0,97 mm bij een veldhoek van 50° . De beeldkwaliteit van de telescoop is goed, dank zij de kleine relatieve opening. Het effectieve licht verzamelende oppervlak is ca. 26 mm^2 . De wiggen van dubbelbrekend kwarts van de scrambler zijn optisch geen ideale pa-



Figuur 2

CAD ontwerp van de OMI spectrometer. In het midden is de basisplaat te zien met aan de voorzijde de optische doos met de telescoop en het UV kanaal en de calibratielamp. Achter de basisplaat bevindt zich de optische doos met kanaal 2 en 3 van de spectrometer. Het gezichtsveld van 100° is aan de onderzijde aangeduid.

rallele plaat. Een voorwerpspunt wordt in het beeldvlak afgebeeld als een aantal punten op geringe onderlinge afstand. Daardoor wordt de effectieve afbeeldingskwaliteit van de telescoop verminderd. Metingen aan het breadboard van telescoop en scrambler toonden aan dat de maximale afstand tussen deze punten ca. 1/15 is van de vereiste ruimtelijke resolutie.

- Spectrometer

Een belangrijk aspect voor bepaling van de kwaliteit van de spectrometer is de optimalisering van de Petzval objectieven. Voor correctie van de optische vertekening in 2 richtingen (rechtheid van de spectra én rechtheid van de spleet afbeelding) was het nodig sommige

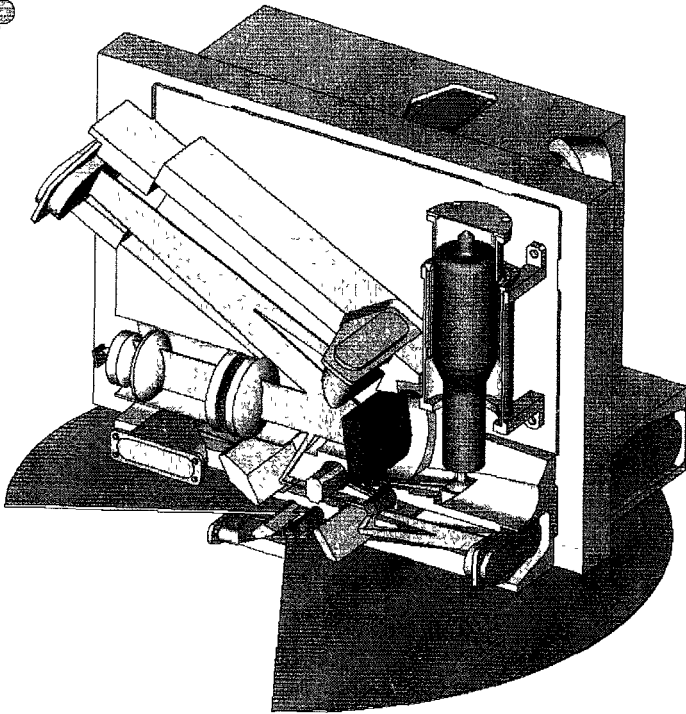
componenten enigszins scheef te plaatsen (zie fig 1)

Het uiteindelijk resultaat is een maximale afwijking van beide "rechtheden" van minder dan 1 pixel.

Ook is de beeldgrootte van een voorwerp op de intreespleet ter plaatse van het detector oppervlak uitgerekend. Het resultaat is, dat de totale beeldvlek over het gehele gezichtsveld en spectraalgebied minder is dan 45 µm (= spectraal resolutie element van 2 detector pixels).

- Efficiency.

Het is belangrijk om de efficiency van het UV kanaal zo groot mogelijk te maken. Het verwachte signaal niveau van kanaal 2 en 3 is zo hoog, dat hier zon-



Figuur 3
CAD ontwerp van de OMI spectrometer zoals in fig 2, met nu de voorkant verwijderd. De verschillende optische componenten, zoals schematisch in fig 1 weergegeven, kan men herkennen.

der enig probleem de relatieve opening kleiner gemaakt kan worden

Bepalend voor de efficiency van het UV kanaal is: de reflectie van 1 dichroïsch oppervlak en 4 spiegels, de gemiddelde diffractie efficiency van het tralie, de transmissie efficiency van de (anti-reflex gecoate) componenten van de Petzval lens en de transmissie van de polarisatie scrambler. Al deze effecten leiden tot een gemiddelde transmissie efficiency van kanaal 1 van 25%. Voor deze berekening is uitgegaan van een "geblazed" tralie met rechte groeven. Omdat strooilicht in het UV kanaal zeer belangrijk is vanwege het grote dynamische bereik van het signaal van de aardatmosfeer tussen 275 - 350 nm wordt wellicht voor een holografisch vervaardigd tralie gekozen met een lagere diffractie efficiency (maar ook een veel lagere lichtverstrooiing).

– Radiometrische nauwkeurigheid

De vereiste radiometrische nauwkeurigheid van OMI is:

- 1 Spectrale radiantie nauwkeurigheid < 3 - 5%.
- 2 Spectrale irradiantie nauwkeurigheid < 2 - 4%.

Om dit te bereiken moet in de eerste plaats de BRDF (= Bidirectional Reflection Distribution Function) van de diffusor bepaald worden met een nauwkeurigheid beter dan 1% (over het hele golflengte gebied).

Daarnaast dient de scrambler een rest-polarisatie te hebben van minder dan 0,5%. Pas dan wordt de gewenste nauwkeurigheid bereikt.

Enkele mechanische aspecten

Uitgaande van de optische configuratie is een concept mechanisch ontwerp gemaakt. Het principe hiervoor is afgeleid van SCIAMACHY.

De structuur is gemaakt van aluminium en bestaat uit een basisplaat en een tweetal blokken, die onderling strak verbonden worden

Enkele eigenschappen van dit concept zijn:

- Zeer goede mechanische stijfheid, dus hoge "laagste" eigenfrequentie
- Goed thermisch gedrag (structuur en spiegels zijn van aluminium).
- Laag gewicht (eerste schatting ca. 15 kg).
- De aluminium spiegels worden geïntegreerd met de structuur en kunnen gemakkelijk van buitenaf gemonteerd dan wel vervangen worden.

Het volume van het optisch-mechanisch deel van OMI is ongeveer 340 x 275 x 210 mm³. Een indruk van de mechanische opzet is weergegeven in fig.2 en fig 3

In fig 2 kijkt men tegen de buitenkant aan, terwijl in fig.3 de voorkant is weggenomen, waardoor de optische componenten van de telescoop, het UV kanaal en de calibratie lamp zichtbaar worden

Tenslotte

In dit verhaal is de nadruk gelegd op de optische aspecten van OMI

Voor een iets bredere oriëntatie wordt de lezer verwezen naar

- Snijders en Visser, Imaging spectrometer with a large field of view, SPIE Proceedings, 2830-35 (1996).
- De Vries, Ozone Monitoring Instrument-Imaging Spectrometer, SPIE Proceedings (in press)