

Een halo op Mars

Na veertig jaar planeetfotografie door ruimte-sondes is er eindelijk een halo gezien op een andere planeet. En hij is nog helder ook.

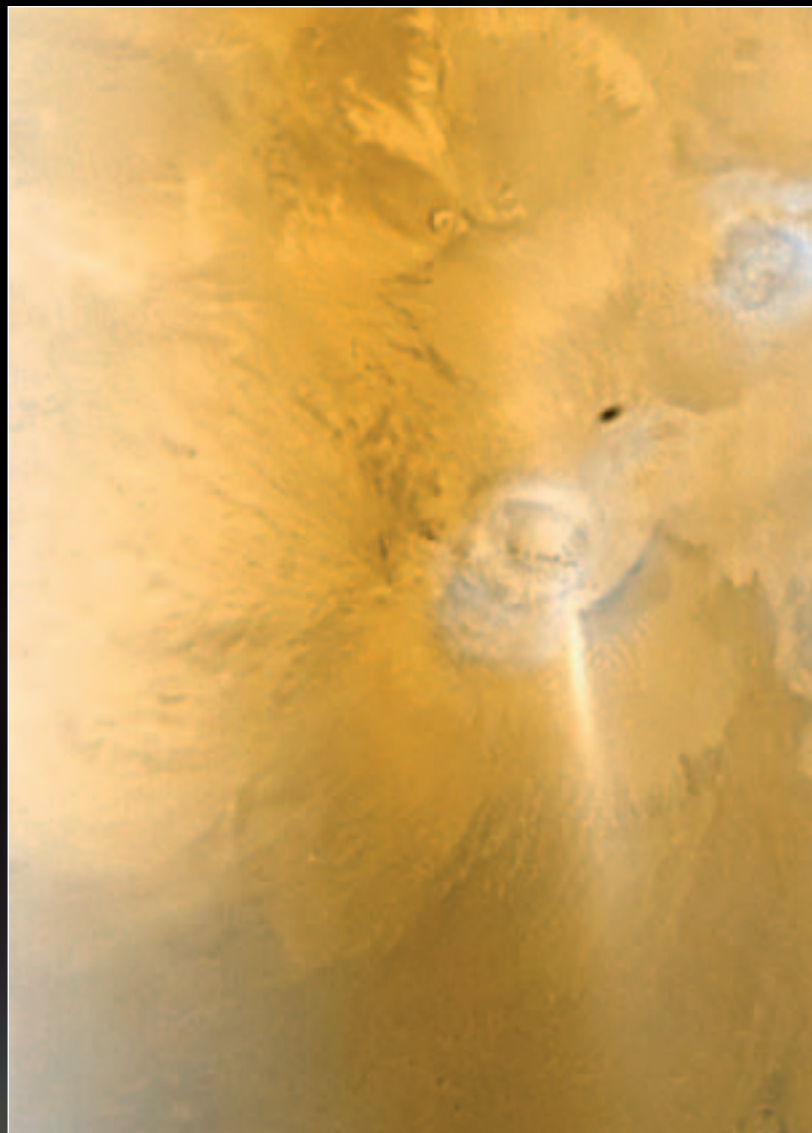
Figuur 1 toont een foto van het oppervlak van Mars, genomen met de Mars Observer Camera (MOC) vanuit de Mars Global Surveyor satelliet (MGS), die sinds 1999 het Marsoppervlak vanaf een hoogte van 380 kilometer systematisch in kaart brengt. De foto is genomen op 28 januari 2006, dat is zeven dagen na het begin van de lente op het noordelijk halfrond van Mars. Midden op de foto is de reuzenvulkaan Arsia Mons te zien, in de rechterbovenhoek Pavonis Mons. Beide vulkanen zijn bedekt met sluibewolking waarvan de deeltjes volgens het MGS-team uit ijskristallen bestaan¹. In de sluibewolking bij Arsia Mons is een heldere witte streep zichtbaar, die door het MGS-team beschreven wordt als: 'een reflectie van zonlicht tegen stof op de bodem, tegen de wolken, en tegen aërosolen in de lucht'¹.

De witte streep in figuur 1 kan worden geïdentificeerd als de *onderzon*, dat is een halo die als het spiegelbeeld van de zon in de wolken verschijnt (fig. 2). Voor zover wij weten is figuur 1 de eerste keer dat er een *exohalo* is gezien, dat wil zeggen een halo op een andere planeet.

Reusachtige spiegel

De onderzon behoort tot de klasse van reflectie-halo's, dat wil zeggen halo's die ontstaan uit lichtwegen die geen netto refractie opleveren. In tegenstelling tot refractie-halo's vertoont de onderzon dus geen spectrale kleuren. De onderzon is de simpelste van alle halo's, en is tevens een van de helderste. Hierdoor is hij, althans op aarde, ook de meest voorkomende halo (zie kader 'De onderzon'). Zijn belangrijkste ontstaansvoorwaarde is de aanwezigheid van zonbeschenen kristallen in de atmosfeer die een zodanig stand hebben ingenomen dat één van hun vlakken horizontaal georiënteerd is. De chemische samenstelling van de kristallen is hierbij niet van belang; de kristallen hoeven zelfs niet eens doorzichtig te zijn om deze halo te kunnen veroorzaken². De horizontale vlakjes werken als een kolossale spiegel, waarin de onderzon – het spiegelbeeld van de zon – zichtbaar wordt (zie kader 'Halo of reflectie?'). Gewoonlijk is de onderzon ietwat langwerpiger, dit omdat de oriëntatie van de kristalvlakken meestal niet volmaakt is (zie fig. 2).

Geprojecteerd op de ondergrond heeft de Mars-onderzon van figuur 1 een lengte van driehonderd kilometer en een breedte van twintig kilometer. Dit komt overeen met een hoekmaat van respectievelijk 40° en 3°. Opgemerkt moet echter worden dat de grote lengte van 40° niet echt is, maar een artefact dat is ontstaan door de wijze waarop de afbeelding wordt verkregen. Net als de aardse NOAA-weersatellieten, beweegt de MGS-satelliet



De onderzon, zoals gefotografeerd door de Mars Global Surveyor satelliet op 28 januari 2006. Noord is boven; het zonlicht komt van links. De zonshoogte is 70° op de plek waar de onderzon verschijnt. De witte streep in het centrum van de foto is de onderzon; de vulkaan vlak erboven is Arsia Mons. In de rechterbovenhoek van de foto is Pavonis Mons te zien. Het zwarte vlekje ten noorden van de onderzon is de schaduw van de Marsmaan Phobos. De foto beslaat een gebied van 1800 bij 2400 km; het midden ligt bij 9° ZB, 101° WL. (Foto NASA/JPL/MSSS, MOC2-1363).

namelijk in een polaire baan die zonsynchroon* is en maakt hij geen echte foto's, maar lijnscans in een richting die loodrecht op zijn bewegingsrichting staat³. De Marsopnamen worden dan hieruit verkregen door opeenvolgende lijnscans zodanig achter elkaar te zetten dat een natuurgetrouw beeld van het planeetoppervlak ontstaat. Maar omdat de onderzon zich vanuit de satelliet gezien

* Bij een zonsynchrone baan draait het baanvlak de satelliet gedurende het (planeet)jaar met de verplaatsing van met de zon mee. Dit houdt in dat bij iedere noordwaarts gerichte evenaarpassage, de lokale tijd op de plek recht onder de satelliet steeds dezelfde waarde heeft; bij de zuidwaartse evenaarpassages is de lokale tijd op de plek recht onder de satelliet dus twaalf uur verder. In geval van MGS vinden de evenaarpassages aan de dagkant plaats om 14.00 uur lokale Marstijd; die aan de nachtkant om 2.00 uur.

G.P. Können

* G.P. Können heeft al ruim 35 jaar een veel plezier theoretisch en experimenteel onderzoek aan halos.

met de satelliet mee verplaatst over het planeetoppervlak, blijft deze langer in het zicht van de lijnscans dan een object op de grond. Als gevolg hiervan wordt het beeld van de onderzon op dit type opnamen enorm opgerekt, en wel in een richting die ongeveer evenwijdig is met beweging van de satelliet. Dit effect, dat ook bekend is van NOAA-opnamen van de spiegeling van de zon in de aardse oceanen, is duidelijk aanwezig in figuur 1: in plaats van naar het noordwesten te wijzen – waar de zon staat – wijst de uitgerekte onderzon naar het noorden, dus 45° 'mis'.

In tegenstelling tot de lengte, bevat de breedte van de Mars-onderzon wel zinvolle informatie. Indien de oriëntatie van de kristalvlakken volmaakt horizontaal zou zijn, zou de breedte van de onderzon – in dit geval zoals gemeten langs de richting van de lijnscans – gelijk moeten zijn aan de diameter van de zon gezien vanuit Mars, dus 0,3°. Zijn werkelijke breedte van 3° betekent dat de horizontale oriëntatie van de kristalvlakken gemiddeld 1° afwijkt van perfect.

Eerdere opnamen

Nadere inspectie van het MOC-archief leert dat de onderzon op Mars ook bij eerdere omlopen is gefotografeerd door de MGS satelliet. Een interessant voorbeeld is opname MOC2-723, genomen op 1 mei 2004, waar een onderzon oplicht op minder dan honderd kilometer afstand van de Marswagentje Opportunity (2° ZB, 5,6° WL). Op die dag (Sol 96 voor Opportunity) nam het Marswagentje met zijn linker navigatiecamera een zwart-witopname van een deel van de Mars-hemel. Dit gebeurde om 11.24 uur lokale zonnetijd, dat wil zeggen ongeveer tweeënhalf uur voordat MOC2-723 werd opgenomen. Deze Opportunity-foto (http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/all/opportunity_n096.html) toont de zuidelijke horizon (azimutaal bereik 157°-200°) en strekt zich uit tot een hoogte van ongeveer veertig graden. De richting van de zon (32° azimut, dus NO) en zijn hoogte (75°) houdt in dat de opname een gebied van de hemel bestreek waarin slechts bij uitzondering halo's optreden⁴. Inderdaad zijn er op de opname geen halo's te zien. Flarden van het cirrusdek dat zo'n honderd kilo-

Halo of reflectie?

Het lijkt misschien een semantische kwestie of men bij de onderzon van een halo of van een reflectie moet spreken, maar dat is het niet. Halo's ontstaan per definitie door lichtverstrooiing aan macroscopische kristallen, dat wil zeggen kristallen die groot zijn ten opzichte van de golflengte van licht. Een reflectiehalo zoals de onderzon is dus evengoed een halo als een refractiehalo, en in halocomplexen kunnen deze twee typen halo's niet los van elkaar worden gezien. Het feit dat de onderzon er precies zo uitziet als het spiegelbeeld van de zon in een meertje, doet daar niets aan af.

Door zijn frequente voorkomen en het feit dat men precies weet waar men hem moet zoeken, vervult de onderzon bij halo-detectie in twee opzichten een soort signaalfunctie: ten eerste is hij vaak een eerste teken dat er zich kristallen in de lucht bevinden; ten tweede wijst hij de weg naar andere halo's die weliswaar lichtzwakker zijn, maar wél meer informatie bevatten over de aard van de kristallen. Om deze laatste reden is er onder meer door het imagingteam van de Huygens-sonde naarstig gezocht naar sporen van de onderzon op foto's die tijdens de afdaling de sonde van Titan zijn genomen, een zoektocht die overigens zonder resultaat is gebleven.



Een volmaakt ronde onderzon: hier zijn de ijskristallen vrijwel perfect georiënteerd. Ofschoon de spiegelende kristalvlakjes zich op verschillende hoogten in de lucht bevinden, verschijnt het zonsbeeld onvervormd. Voor de weerspiegeling van een nabij voorwerp geldt zo iets niet. Daarom kan men, in tegenstelling tot in een meertje, wél het spiegelbeeld van de zon op een wolk ijskristallen te zien krijgen, maar nooit dat van een aards object.

meter verderop de onderzon genereerde, zijn echter duidelijk zichtbaar.

Andere planeten

Het hier gepresenteerde onderzoek is een logisch vervolg op eerdere zoektochten naar halo's en andere verschijnselen uit de meteorologische optica op foto's die met ruimtesondes zijn gemaakt. Tot nu toe hebben deze zoektochten slechts resultaat opgeleverd voor de planeet aarde, waarbij op opnamen vanuit de ruimte behalve de onderzon⁵ ook een duidelijke glorie⁶ is geïdentificeerd^{**}. Ondanks theoretische studies⁷ en simulaties^{8,9} van halo's die in het zonnestelsel zouden kunnen voorkomen, is een exohalo nog niet eerder opgemerkt op opnamen van een interplanetaire sonde. De enige planeet (anders dan de aarde) waarop ooit verschijnselen uit de me-

eteorologische optica zijn waargenomen is Venus, waar in 1974 uit metingen van aardse instrumenten een signaal vanuit zijn hoge, koude atmosfeer van een zwavelzuur-regenboog¹⁰ is gedetecteerd en in 1988 mogelijk van een zwakke halo door verontreinigd waterijs¹¹. Het is veelbelovend dat er nu een planetaire atmosfeer is gevonden waarin halostrooiing zonder enige twijfel optreedt; figuur 1 toont ons dat een exohalo soms verrassend helder kan zijn.

De onderzon: veelvoorkomend maar slechts zelden gezien

Op aarde is de onderzon de meest voorkomende halo. Dit heeft twee redenen: ten eerste is zijn licht geconcentreerd in een kleine ruimtehoek, waardoor hij veel helderder is dan andere halo's, ten tweede zijn de ontstaanscondities van deze halo zo simpel dat ze vaak vervuld zijn. Er hoeft maar aan vier voorwaarden te zijn voldaan: er moeten zich zonschijnen kristallen in de lucht bevinden, ze moeten van voldoende afmeting zijn (groter dan ~20 µm), ze moeten zodanig zweven dat één van hun vlakken horizontaal is georiënteerd, en deze horizontale kristalvlakken moeten goed genoeg gevormd zijn om als spiegelen oppervlak te kunnen dienen.

Om de onderzon daadwerkelijk te zien, is echter nog een vijfde voorwaarde nodig: de waarnemer moet zich boven de kristallen bevinden. Deze laatste voorwaarde zorgt ervoor dat deze frequent voorkomende halo toch maar door betrekkelijk weinig mensen is gezien. Dit geldt niet voor piloten: op vrijwel al hun werkdagen krijgen ze de onderzon vele malen te zien.



De onderzon zoals gezien vanuit de cockpit van een vliegtuig.

Net als de aardse halo's en de vermoede Venus-halo, wordt de Mars-halo klaarblijkelijk veroorzaakt door ijskristallen. Nog steeds bestaat in het zonnestelsel de mogelijkheid dat er ook halo's worden opgewekt door kristallen van een meer exotische samenstelling. Misschien wordt, ooit in de toekomst, ook dat soort halo's eens gezien door de camera's of de sensors van interplanetaire ruimtevoertuigen of landers.

Dit artikel is een Nederlandse bewerking van een artikel¹² dat juni jl. verscheen in het Engelse tijdschrift *Weather*.

Referenties

1. Malin, M.C., Edgett, K.S., Carr, M.H., Danielson, G.E., Davies, M.E., Hartmann, W.K., Ingersoll, A.P., James, P.B., Masursky, H., McEwen, A.S., Soderblom, L.A., Thomas, P., Veveřka, J., Caplinger, M.A., Ravine, M.A., Soulanille, T.A. en Warren, J.L. (2006), 'Arsia and Phobos', *NASA's Planetary Photojournal* (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>), MOC2-1363, 6 februari 2006.
2. Können, G.P. (2004), 'Titan halos'. In: K. Fletcher (red.), *Titan, from discovery to encounter*, ESA SP-1278, Noordwijk Netherlands, blz. 323-330.
3. Malin, M.C., Danielson, G.E., Ingersoll, A.P., Masursky, H., Veveřka, J., Ravine M.A., en Soulanille T.A. (1992), 'The Mars Observer Camera', *Journal of Geophysical Research*, **97** (E5), blz. 7699-7718.
4. Tape, W. (1994) *Atmospheric halos*, vol. 64 van de Antarctic Research Series, American Geophysical Union, Washington DC.
5. Können, G.P. en Zwart, B. (1975), 'The subsun on satellite pictures', *Weather* **30**, blz. 372-373; zie ook *Zenit* (1977) **4**, blz. 154-155.
6. Laven, P. (2005), 'Atmospheric glories: simulations and observations', *Appl. Opt.* **44**, blz. 5667-5674.
7. Whalley, E. en McLaurin, G.E. (1984) 'Refraction halos in the solar system: I. Halos from cubic crystals that may occur in atmospheres in the solar system', *J. Opt. Soc. Am.* **A 1**, blz.1166-1170.
8. Können, G.P. (2003), 'Symmetry in halo displays and symmetry in halo-making crystals', *Appl. Opt.* **42**, blz. 318-331.
9. Cowley, L. (2006), Atmospheric Optics Website: <http://www.atoptics.co.uk/>.
10. Hansen, J.E. en Hovenier, J. (1974), 'Interpretation van de polarization van Venus', *J. Atm. Sci.*, **31**, blz. 1137-1160.
11. Können, G.P., Schoenmaker A.A. en Tinbergen J. (1993), 'A polarimetric search for ice crystals in the upper atmosphere of Venus', *Icarus* **102**, blz. 62-75.
12. Können, G.P. (2006), 'A halo on Mars', *Weather* **61**, blz. 171-172.

** Opgenomen op 28 januari 2003 vanuit de op 1 februari 2003 verongelukte spaceshuttle Colombia.