

Auteur: Prof. Dr. Rob Rutten

De Zon

De zon is een ster. Niet anders dan de duizenden sterren die je 's nachts kunt zien, maar wel véél dichterbij. En dus véél groter en helderder aan onze hemel, en ook de enige ster die we goed kunnen zien. Zonnewaarnemers zoals ik doen dat met telescopen op aarde en met telescopen in de ruimte. In dit artikel gaat het vooral over een telescoop op aarde: onze eigen nieuwe Nederlandse telescoop voor zonsonderzoek, de "Dutch Open Telescope" (Open Nederlandse Telescoop) op La Palma, het meest westelijke Canarische Eiland voor de westkust van Afrika. Over waarom deze telescoop zo goed (= scherp) is, wat we ermee doen, en wat we ermee willen leren. Maar eerst wat meer over de zon zelf: onze eigen ster.

De Dutch Open Telescope (DOT) op La Palma, met gesloten koepeltent. De DOT is een bijzondere zonnetelescoop van Nederlandse makelij die buitengewoon scherpe beelden van het zonoppervlak levert. Ze zijn vooral goed voor de bestudering van magnetische velden in de zon. Dit artikel gaat over de zon, deze telescoop, en het magnetisme van de zon.

Maan, planeten, zon, sterren

Sterren zijn twinkellende lichtpuntjes aan de donkere nachthemel. Planeten zijn helderder en twinkelen niet. Hun grotere helderheid is maar schijn, want al hun licht is gestolen: het is alleen maar weerkaatst zonlicht. Dat geldt ook voor de maan, en die weerkaatst zonlicht bovendien bijzonder slecht. De maan heeft een erg zwart oppervlak, net zo donker als een lavaveld in IJsland of een andere vulkanische streek. De maan is alleen maar zo fel aan de hemel omdat hij zo groot is. Ogenschijn-

lijk groot, van ons uit gezien, want zo groot is de maan niet, slechts een kwart van de aarde. Alleen staat hij relatief dichtbij, maar 400 000 km weg. Als een donkere maar grote spiegel kaatst hij toch nog vrij wat zonlicht naar ons toe.

Planeten met een dik wit wolkendek weerkaatsen zonlicht veel beter: Jupiter en Saturnus spiegelen wel de helft van het opvallende zonlicht terug, en ze zijn bovendien veel groter dan de maan (ruim tien maal zo groot als de aarde). Maar ze staan wel veel verder weg dan de maan, en dus verbleken de planeten als de maan vol aan de hemel staat - terwijl de maan verbleekt bij de zon zelf.

De zon is veel en veel groter dan de planeetjes die erom heen draaien. Op het Domplein in Utrecht staat voor het Akademiegebouw een bronzen beeld van de zon van anderhalve meter doorsnee (de zon vormt het wapen van de Utrechtse Universiteit). Dat beeld is een miljard maal kleiner dan de echte zon! Op die schaal meet de aarde maar 13 millimeter en komt flink wat straten verderop (op de Vismarkt). De grootste planeet, Jupiter, meet dan 14 cm en komt in Hoog Catharijne; de verste planeet, Pluto, is maar 2 millimeter en hoort op z'n 6 km van het Domplein. Zo klein zijn de planeten!

voetnoot: De bronzen zon werd in 1994 op het Domplein geplaatst met de bedoeling dat de negen planeten op dezelfde schaal over heel Utrecht zouden worden verspreid als een 1-op-de-miljard-schaalmodel, elk met een mooie mast als blikvanger. Helaas is dat door geldgebrek nog steeds niet gebeurd. Als er onder de Universum-lezers toevallig een rijke stinkerd schuilt, wil die dan het "Utrechtse zonnestelsel" helpen realiseren?

De zon heeft een doorsnee van 1.4 miljoen km en is 100x zo groot als de aarde. Toch lijkt hij klein aan de hemel, maar dat is omdat de afstand van de aarde tot de zon nog weer 100x groter is dan de zon zelf. Niettemin is de zon ook in werkelijkheid een kleine ster. Er zijn sterren die nog weer 100x groter zijn! Maar die staan ontzettend veel verder weg. De dichtstbijzijnde ster voorbij de zon heet Proxima Centauri en staat op 4.2 lichtjaar, dat is 276 000x zo ver, dus oogt 276 000x kleiner van ons uit gezien (en geeft $276\ 000 \times 276\ 000 = 76$ miljard maal minder licht). Daarom zijn alle andere sterren puntjes aan de hemel, en ze blijven puntjes ook met een telescoop die 100x vergroot.

De zon als voorbeeldster

In tegenstelling tot de maan en planeten straalt de zon zelf. De zon is een hete gasbol waar intens licht uit ontsnapt. Net als bij de andere sterren wordt die energie in de allerbinnenste delen vrijgemaakt door kernfusie, het samensmelten van waterstofkernen tot helium vergelijkbaar met een waterstofbom. Deze energie reist langzaam door de zon heen (dat duurt wel honderduizend jaar) tot hij aan het oppervlak als zichtbaar licht ontsnapt. Dat is niet een echt oppervlak, maar de laag in het gas die wij zien omdat het licht daar vertrekt. Eronder is het licht nog opgesloten. Erbuiten passeert het zonlicht ongehinderd en verlicht zo de omgeving inclusief onze aarde (de zon is de meest milieu-vervuilende kernreactor binnen vier lichtjaar!).

De zon is de enige ster die we van nabij kunnen zien. Dat is het enige bijzondere aan deze doodgewone huis-tuin-en-keuken ster aan de buitenrand van de Melkweg. De zon is een langlevend, relatief koel dwergsterretje, veel minder opzienbarend dan de grootste sterren. Die leven maar kort en spatten dan met een grote knal uit elkaar. De zon zal daarentegen nog vijf miljard jaar kalmpjes schijnen, en dan tijdelijk groeien tot een rode reuzenster en vervolgens ineenschrompelen tot een

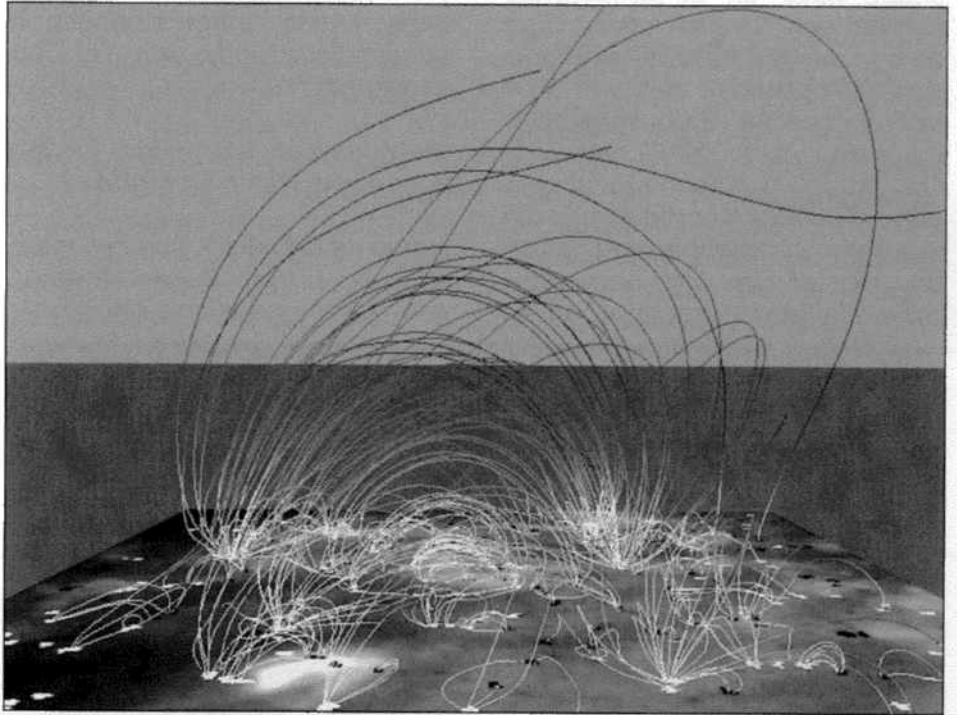
witte dwergster. Voorlopig (de komende vijf miljard jaar) is er dus niets bijzonders te beleven. Wat een saaie ster om zo dicht naast te wonen!

Magnetische zon

De zon een saaie ster? Niet echt! De zon straalt buitengewoon stabiel (gelukkig maar, want anders hadden we het hier knap moeilijk) maar is toch allesbehalve konstant. Dat komt omdat de zon magnetisch is. De meeste "koele" sterren zoals de zon zijn magne-

wandelen op het zonsoppervlak (dat is lastig want het is niet een echt oppervlak, het is maar gas; dat gas is bovendien 200x ijler dan de lucht om ons heen, en het heeft een temperatuur van 6000 graden: je wordt er meteen ge-oosterd) met een kompas in je hand dan zou dat kompas voortdurend andere kanten uit draaien.

Het magnetisch veld van de zon lijkt veel meer op een kluwen spaghetti dan op een staafmagneet. Onderstaand figuur toont hoe wanordelijk het veld door het



Het zonnetapijt: een schets van het magneetveld van de zon. Het groene vlak stelt een klein stukje zonsoppervlak voor. De zwarte en witte vlekjes zijn de plaatsen waar relatief sterk magnetisch veld er doorheen steekt, wit omhoog en zwart omlaag. De veldsterkte in die plekjes is twee- tot drieduizend keer groter dan het magnetisch veld van de aarde waar je kompasnaald zich naar richt. De kromme lijnen zijn een deel van de veldlijnen. Ze lopen altijd van het ene soort plek ("polariteit") naar het andere soort, van plus naar min, en vormen zo bogen en lussen net als de draadjes in een hoogpolig tapijt. Sommige veldlijnen verbinden veldplekjes op heel grote afstand: die komen heel hoog boven het oppervlak. Omdat de veldplekjes wanordelijk over het oppervlak zijn verspreid zijn er veel verschillende verbindingen, in korte maar ook in lange bogen. Bovendien verschijnen er steeds nieuwe veldplekjes en verdwijnen er andere, en ook bewegen ze voortdurend over het oppervlak. Samen levert dat een ingewikkeld verknoopt, steeds veranderend geheel aan veldlijnen.

tisch, veel zijn dat zelfs aanzienlijk erger, sommige wat minder. Wat houdt dat magnetisch zijn in?

Niet wat je op aarde als magneetveld kent. De aarde heeft een keurig gekromd veld dat met nette halfronde veldlijnen de noordpool en de zuidpool verbindt, net zoals bij een staafmagneet. Je kunt daarom overal op aarde met een kompas de richting van de noordpool vinden. Maar als je zou rond-

oppervlak naar buiten steekt. Die schets geldt voor een "rustig" deel van het zonsoppervlak. Er zijn echter ook actieve gebieden, met zonnevlekken en fakkelvelden waarin nog veel meer magnetisch veld naar buiten steekt. De hoeveelheid actieve gebieden en zonnevlekken wisselt met de tijd, met ruwweg elke 11 jaar een piek; zo'n piek hebben we net achter de rug. De komende jaren wordt de zon weer wat rustiger.

Magnetische corona

De laatste jaren wordt de zon voortdurend en nauwkeurig waargenomen met telescopen in de ruimte. Op <http://soho.nascom.nasa.gov/> kun je zulke beelden vinden, bijna a la minuut (en ook een screensaver die voortdurend nieuwe opnamen van de zon op je scherm toont). Veel van die beelden worden gemaakt in licht dat voor ons onzichtbaar is: ultraviolette straling en Röntgenstraling. Dat licht komt niet van het oppervlak waar de zonneshijn ont-snapt, maar uit de omhullende corona, een ijle gaswolk rondom de zon die nog weer veel heter is dan het oppervlak zelf: wel twee miljoen graden. Zo'n opname is gemaakt met de TRACE satelliet. Op <http://www.space.lockheed.com/TRACE/welcome.html> zijn reeksen van zulke beelden te vinden die tot films zijn aaneengeplakt. Ze tonen prachtig hoe de

corona voortdurend verandert. De magnetische lussen zitten vanonder vast in de veldplekjes op het oppervlak en moeten volgen hoe die over het oppervlak rond-bewegen. Af en toe komt het veld daarbij zo in de knoop dat een heftige uitbarsting volgt om de eindjes weer recht te trekken. Daarbij worden miljarden tonnen materie de ruimte in geslingerd. Zulke uitbarstingen vinden een paar keer dag plaats. Als ze toevallig richting aarde gaan krijgen de bewoners van noordelijke streken fraai Noorderlicht te zien, en soms veroorzaken zulke zonne-uitbarstingen heftige storingen in onze radioverbindingen en electriceitsnetten.

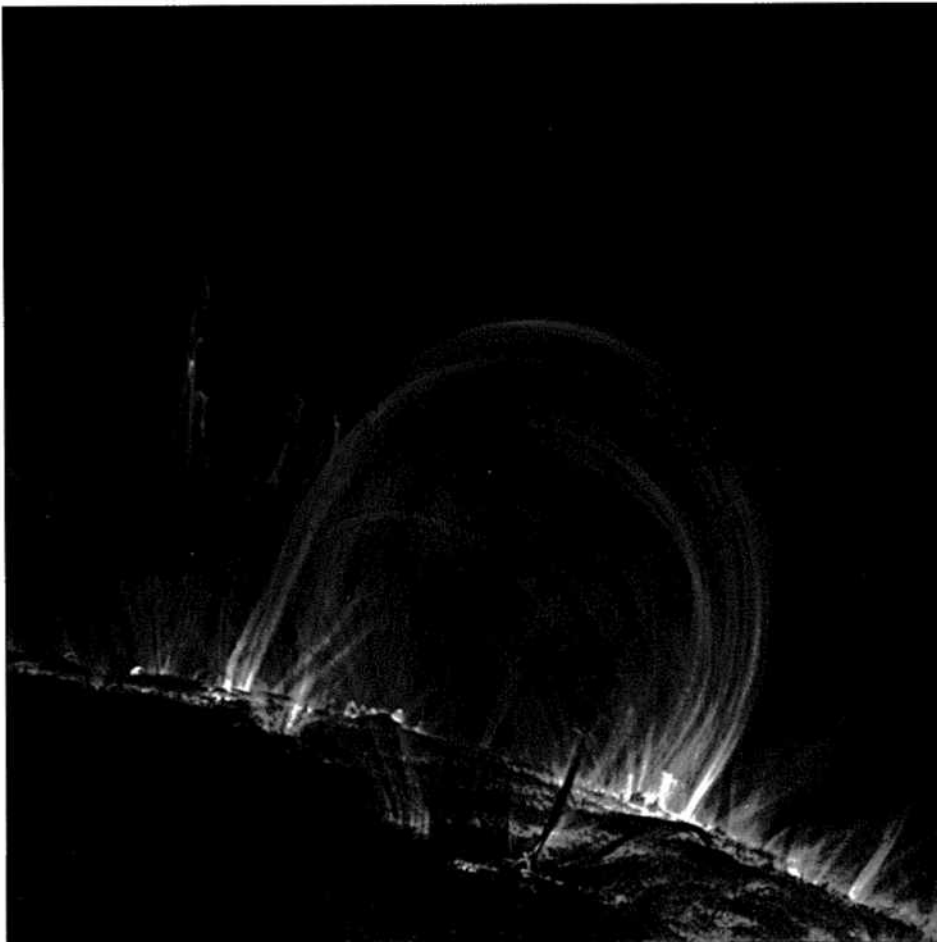
Magnetische koppeling tussen zonsoppervlak en corona

Het is niet duidelijk hoe het magnetisch veld precies de structuur van de corona regelt als gevolg

van de veldbewegingen die worden opgelegd in de laag die wij als zonsoppervlak waarnemen. Sterker nog, feitelijk begrijpen we nog helemaal niet erg veel van het zonnemagnetisme. Het wordt veroorzaakt door een dynamo in het zonsinwendige. In je fietsdynamo zorgen draaiing en een magneet voor de opwekking van elektrische stroom; in de zonnedynamo zorgen stromen en draaiing voor magnetisch veld. De laatste jaren is veel kennis verzameld over het inwendige van de zon, vooral gebruik makend van het feit dat de zon als een bromtol staat te neurie"en: de zon zit tjokvol geluid en dat wordt gebruikt om te meten hoe de zon van binnen in elkaar steekt. Daaruit blijkt dat de dynamo vermoedelijk zit in een dunne laag op twee-derde zonsstraal van het middelpunt, net onder de "convectie-zone" waarin de zonne-energie door borrelen van het gas zoals in kokend water naar buiten wordt gevoerd. Maar hoe de zonnedynamo precies werkt blijft vooralsnog een raadsel. En waarom die dynamo elke elf jaar piekt in de productie van zonnevlekken, zonnevlammen en coronale uitbarstingen eveneens. Maar gegeven het feit dat de zon een dynamo bezit, volgt de vraag hoe het zo opgewekte magnetisch veld de hete corona rondom de zon produceert. Dit is de vraag waar de Nederlandse zonnefysici (vooral in Utrecht) zich nu mee bezig houden. We doen dat gebruik makend van onze gloednieuwe Dutch Open Telescope (DOT). Die is bij uitstek geschikt om deze vraag te onderzoeken.

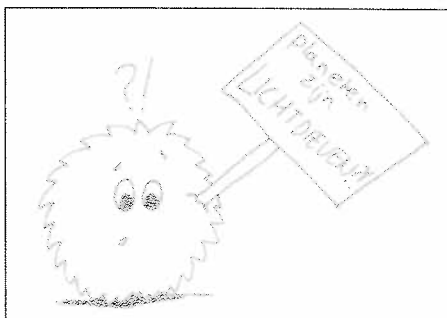
Ouderwetse zonnetelescopen

Ik moet eerst wat zeggen over gangbare zonnetelescopen. De DOT wijkt daar namelijk flink van af. Tot dusver zijn zonnetelescopen dun en lang. Dun omdat ze niet zo'n grote doorsnede hebben. De spiegel (of soms een lens) die het beeld vormt is veel kleiner dan bij de telescopen voor de (andere) sterren. Die zijn al vlug een paar meter in doorsnede, tot acht tot tien meter toe (op Hawaii en in Chili). Bijna alle zonnetelescopen hebben daarentegen een doorsnede van maar een halve



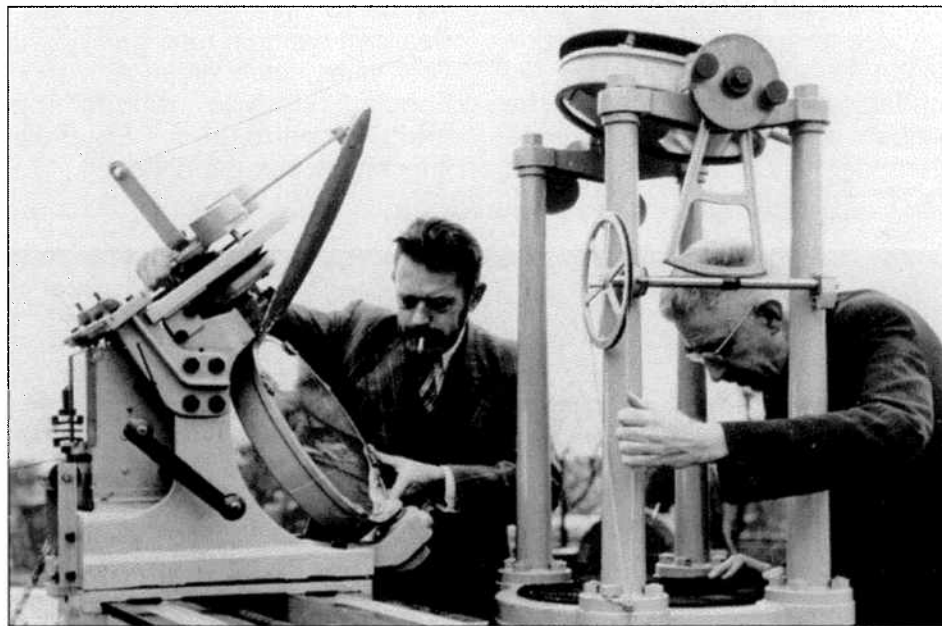
Opname van de zon in extreem ultraviolette straling (golflengte 17.1 nm). Deze voor ons onzichtbare straling wordt veroorzaakt door ijzerdeeltjes die negen electronen kwijt zijn geraakt ("ionisatie"), hetgeen gebeurt bij een temperatuur van 1 miljoen graden. De ijzerdeeltjes laten zien hoe de magnetische veldlijnen lopen, net zoals ijzervijlsel dat doet bij een staafmagneet. Je ziet hier maar een klein stuk van de zon, nabij de rand. Het hete ijzergas zit opgesloten in magnetische lussen, te vergelijken met de schets in de laatste figuur op de vorige pagina maar dit is echte werkelijkheid. Er zijn ook donkere omhoog stekende slierten die bestaan uit veel koeler waterstofgas (slechts 10 000 graden).

meter tot driekwart meter. Dat komt natuurlijk omdat de zon zoveel licht geeft. De spiegel hoeft niet zo groot te zijn om daar genoeg van op te vangen. Maar zonnetelescopen zijn wel heel lang. In Amerika staat er een die maar 80 cm doorsnede heeft maar wel net zo hoog is als de Utrechtse Dom, 100 meter. Dat is om voldoende vergroting in het beeld te krijgen. Om de dunne sliertjes van het magneetveld scherp te zien moet het beeld enorm worden vergroot. Dat vereist een lange brandpuntsafstand. Er zijn drie problemen met zulke telescopen. Ten eerste kun je ze niet direct op de zon richten. Die staat immers niet stil maar schuift dagelijks van oost naar west langs de hemel omdat de aarde om zijn as wentelt. Een honderd meter lange telescoop zou heel precies mee moeten bewegen, maar dat is moeilijk voor z'n lange buis. De standaard oplossing is



de telescoop. De slede links dient om ter compensatie van de met de seizoenen wisselende zons-hoogte te Oorpronkelijk was deze "zonneopstelling" een van de grootste ter wereld. Als je in Utrecht sterrenkunde gaat studeren kun je er zelf mee werken.

Het tweede probleem is dat het zonlicht nabij het brandpunt wordt samengeknepen. Met alle hitte erin! Dat betekent dat de lucht in de buis heet wordt en gaat wervelen, net als de lucht die 's zomers boven zwart asfalt hangt te trillen. Dat bederft de beeldkwaliteit. Om dat te voorko-



De "coelostaat" van de zonnetelescoop in Utrecht, nu onderdeel van Museum Sterrewacht Sonnenborgh waar je hem in werking kunt zien. Op deze foto van een halve eeuw geleden wordt hij gebruikt door twee beroemde sterrekundigen, links Jaap Houtgast, rechts Marcel Minnaert.

dat het zonlicht met twee langzaam draaiende spiegels in een stilstaande telescoopbuis wordt gestuurd. De spiegels zetten de zonsbeweging langs de hemel stil.

De linker spiegel draait om een as evenwijdig aan de aardas en compenseert zo voor de draaiing van de aarde. De rechter spiegel kaatst het zonlicht naar beneden, naar het objectief (eerste lens) van

men worden zonnetelescoopbuizen luchtledig gemaakt: zonder lucht is er niets dat kan trillen. Dan rijst het probleem dat er glazen afdekvensters nodig zijn aan beide einden van de buis. Die staan onder spanning (want de lucht er buiten drukt er wel op) en bederven zelf weer de beeldscherpte.

Het derde probleem is dat ook de lucht buiten de telescoop kan

wervelen en trillen. Je kunt immers alleen naar de zon kijken als hij schijnt. De zonneschijn verhit de omgeving van de telescoop. Luchttrillingen voor de telescoop zijn het gevolg, en ook die bederven de beeldscherpte. Dat betekent dat je met een zonnetelescoop op een plaats moet gaan zitten waar zulke luchttrillingen door zonneverwarming het minst erg zijn.

De Dutch Open Telescope

Onze DOT pakt deze drie problemen alle drie aan op een nieuwe manier. De DOT is ontworpen en gebouwd door mijn Utrechtse collega Rob Hammerschlag. Hij staat op de top van de hoogste vulkaan (2350 meter) van La Palma. In uitgebreide metingen is vastgesteld dat dat de beste plaats in en nabij Europa is wat betreft luchttrillingen. Dat komt omdat er meestal een stevige passaatwind waait, die vanaf de oceaan gladjes over de berghelling strijkt. De harde wind voert de trillingen die ontstaan door zonneverhitting dicht langs de grond af. De DOT steekt op z'n vijftien meter hoge toren daar bovenuit. Verder is de DOT de eerste zonnetelescoop zonder telescoopbuis maar juist helemaal open. Dat is goed te zien op de foto's. De wind waait dwars door de DOT, en voert ook wervels binnen de telescoop af, tussen de vangspiegel en het brandpunt. De parabolische spiegel heeft een doorsnede van 45 cm en het brandpunt is er twee meter vandaan. De DOT is dus een heel korte zonnetelescoop. Hij werkt dan ook niet met extra spiegels om de zonsbeweging langs de hemel op te heffen, maar beweegt zelf in zijn geheel mee, langzaam draaiend van oost naar west gedurende de dag. Net zoals sterren telescopen 's nachts met de sterren meedraaien.

In het brandpunt van de DOT wordt al het zonlicht samengeknepen. Daar zit een spiegelletje met een klein gaatje (maar 2 milli-

meter) dat met langstromend water wordt koel gehouden. Alleen het licht door het gaatje wordt gebruikt: het eindigt in een



Drie medewerkers van het DOT team bezig met de bekabeling van de digitale camera's. Je ziet de top van de telescoop in parkeerstand onder de gesloten koepeltent. De beelden gaan door optische fibers naar een Zweeds gebouw 100 meter verderop. Maart 2003.



De DOT van dichtbij, met Felix Bettonvil en Pit Sütterlin. De uiterst zware structuur is nodig om zeker te zijn dat de telescoop ook in heel harde wind niet wiebelt. Op de voorgrond de spiegeldeksel. Door de slangen wordt lucht afgezogen om luchtwervelingen te voorkomen.



zestal digitale cameras. Onderweg zitten lenzen die de feitelijke brandpuntsafstand vergroten tot 25 meter, dus stiekem is de DOT toch een lange telescoop.

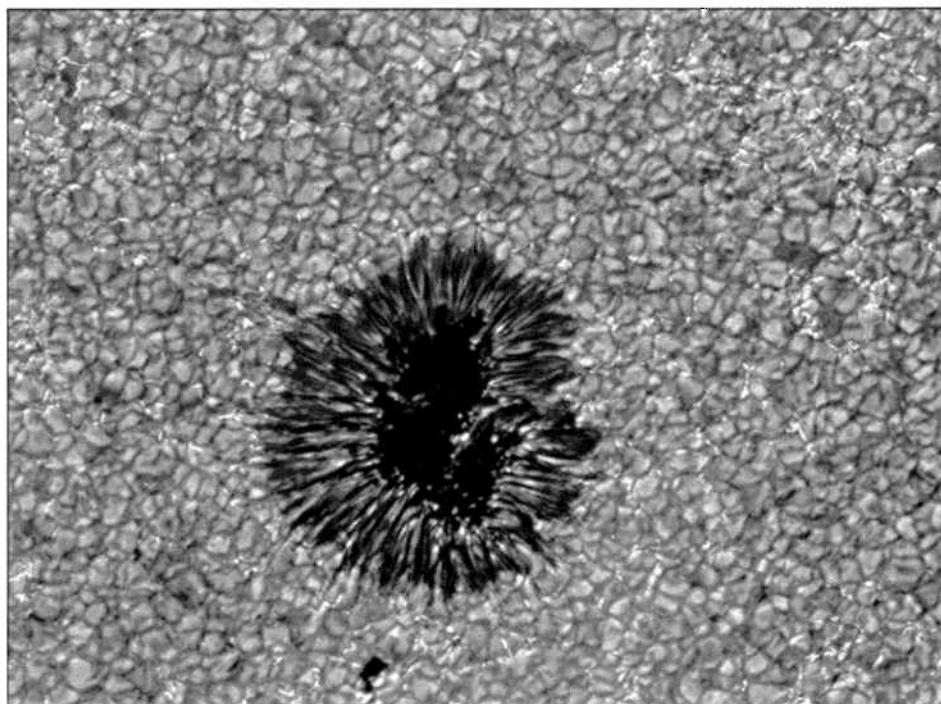
Ook zitten er filters tussen die speciale kleuren in het zonlicht doorlaten. Sommige komen uit de diepste waarneembare lagen, andere komen uit lagen een paar honderd kilometer hogerop. Door de beelden uit de verschillende lagen te vergelijken kunnen we onderzoeken hoe de magnetische velden op weg naar de corona veranderen. De beelden van de DOT zijn buitengewoon scherp:

ook al is de DOT relatief maar een kleine (en goedkope) telescoop, in beeldproductie is hij wel de beste ter wereld! Je kunt zulke beelden aanklikken op de DOT website (<http://dot.astro.uu.nl>), maar ook films die nog een veel betere indruk geven van de fijnstructuur op het zonneoppervlak en de voortdurende veranderingen daarin.

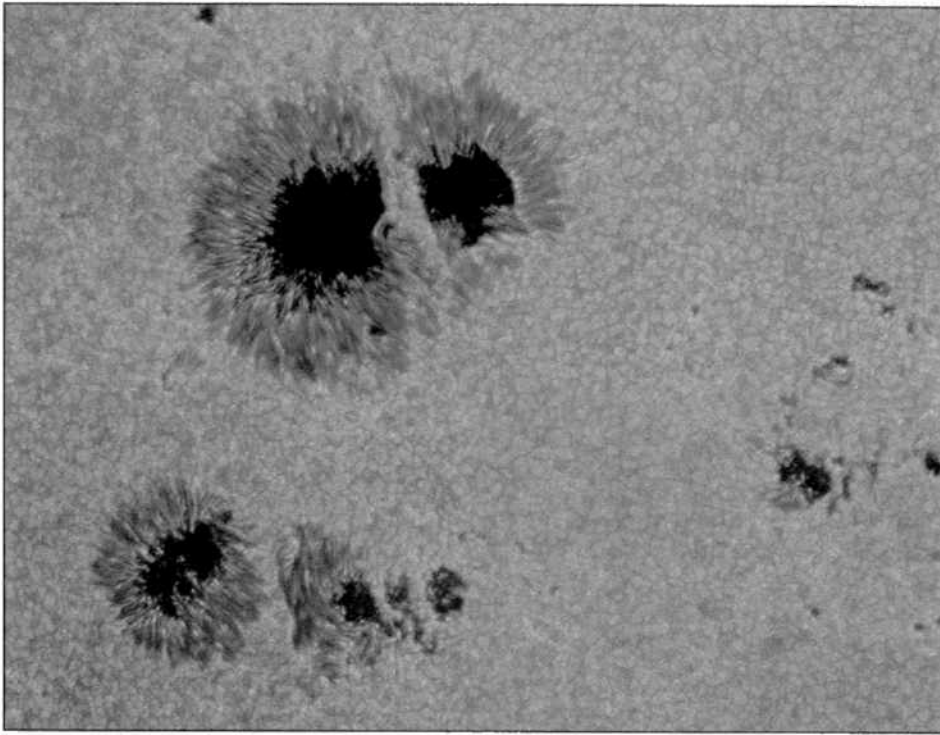
Magnetische velden met de DOT

Met de DOT wordt dus op een nieuwe manier naar de zon gekeken. Met deze scherpe telescoop kunnen we de dunne magneetveldsliertjes scherper waarnemen dan met alle voorgaande zonnetelescoppen, en ook nog tegelijkertijd op verschillende hoogten in de atmosfeer van de zon. Zo kunnen we onderzoeken hoe die sliertjes in elkaar zitten, hoe ze bewegen, en hoe ze de corona van de zon beïnvloeden.

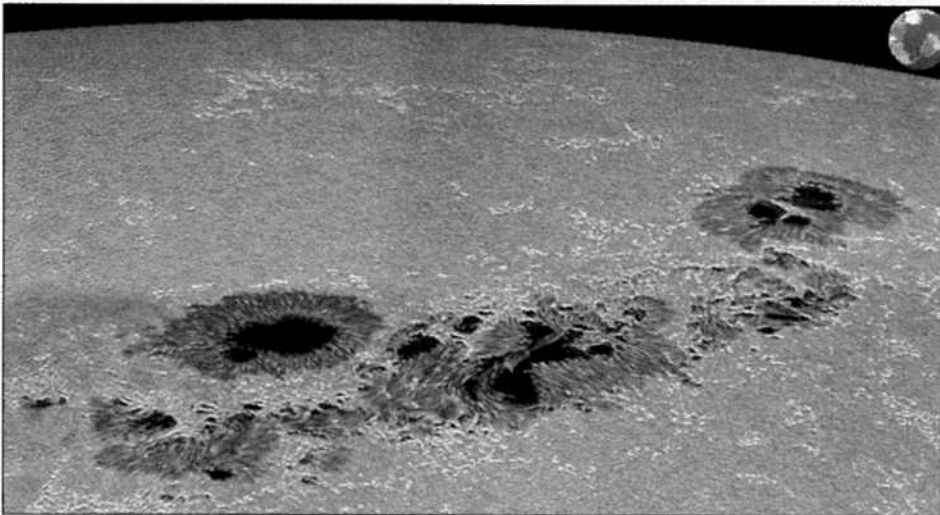
Daar zijn we druk mee bezig! Veel meer daarover (maar wel in Engels) kun je vinden op <http://dot.astro.uu.nl>. En hulp kunnen we ook gebruiken!



Een DOT opname van een zonnevlek. Een forse zonnevlek als deze is zo groot als de hele aarde. Het centrale deel ("umbra") is donker omdat het maar half zo heet is als het omringende gas. Rond de vlek zie je draderige strepen ("penumbra") die tonen hoe het magnetisch veld uitwaaiert. Buiten de vlek is er een korrelige structuur die komt door het opborrelen van heet zonnegas. Tussen de hete bellen zie je hier en daar fijne witte puntjes. Dit zijn de magnetische plekje die in de schets in de figuur op pagina 7 schematisch zijn aangegeven. Ze zijn heel klein: ze zijn alleen maar te zien met een uiterst scherpe telescoop zoals de DOT.



DOT opname van een actief gebied met meerdere zonnevlekken. De bovenste lijkt we in twee"en geknipt. Paren zonnevlekken hebben meestal tegengestelde "polariteit" (= richting van het magnetisch veld, zoals noord- en zuidpool op aarde).



Een mozaiek van meerdere DOT opnamen samengevoegd tot een overzichtsbeld. Dit actieve gebied in April 2001 was het grootste van de inmiddels afgelopen piek in zonne-activiteit. Je ziet de rand van de zon op de achtergrond. Een opname van de aarde is toegevoegd op dezelfde schaal. De witte gebieden zijn fakkelvelden, tjokvol sterk magnetisch veld. Het allersterkste veld bevindt zich echter in de donkere kernen van de vlekken, tot tienduizend maal zo sterk als het magnetisch veld van de aarde. Uit dit gebied kwam de sterkste zonnevlam die ooit is waargenomen, een explosie veel heftiger dan alle atoombommen op aarde tezamen.



Pit Sütterlin in de controlekamer van de DOT, onderin een naburig Zweeds gebouw. Hier komen de DOT beelden binnen. Pit heeft een ingenieus computerprogramma ontwikkeld waarmee de DOT beelden ook nog worden gecorrigeerd voor wervelingen in de lucht boven de DOT. Op dit moment draait dit programma op alle 12 computers in deze kamer; we zijn van plan dit te gaan doen op maar liefst 112 computers zodat we veel meer beelden tegelijk kunnen verwerken.

De Dutch Open Telescope op La Palma. Je ziet de op de zon gerichte vangspiegel (45 cm doorsnee) in de geheel open telescoop bovenop de geheel open toren. De koepeltent is opengeklapt. De hemel is blauw zoals het hoort op de Canarische Eilanden, de oceaan eveneens. De witte doos op de voorgrond bevat een tank met water waarmee het spiegelkje in het brandpunt van de vangspiegel wordt gekoeld. De verdere optiek en de cameras zitten in de top van de telescoop. Je kunt goed zien dat er plaats is voor een grotere spiegel: wij zijn van plan over een paar jaar een 140 cm spiegel in de DOT te plaatsen (kwestie van geld!). Op de achtergrond de koepel van een Scandinavische sterretelescoop van 2.5 meter doorsnee.

