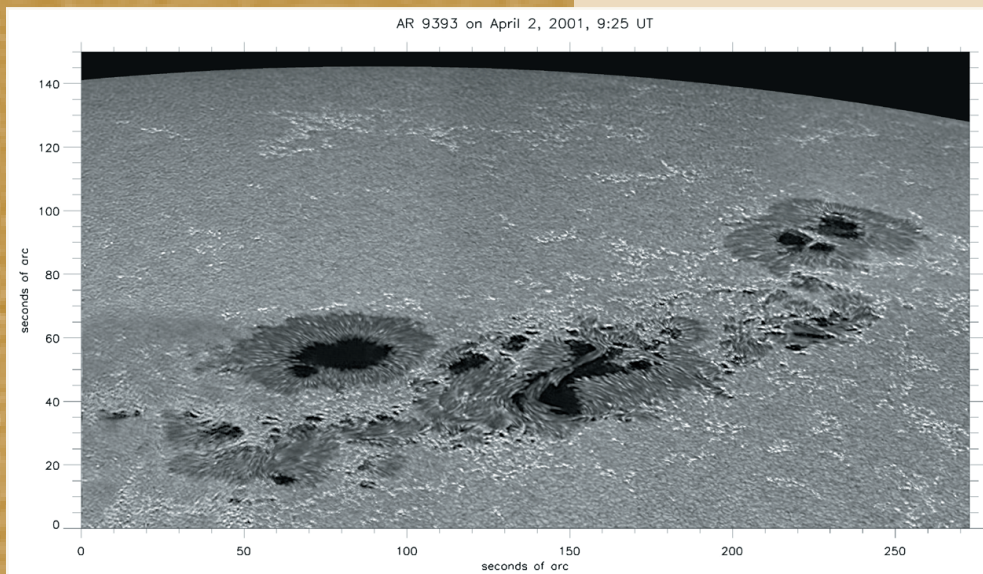


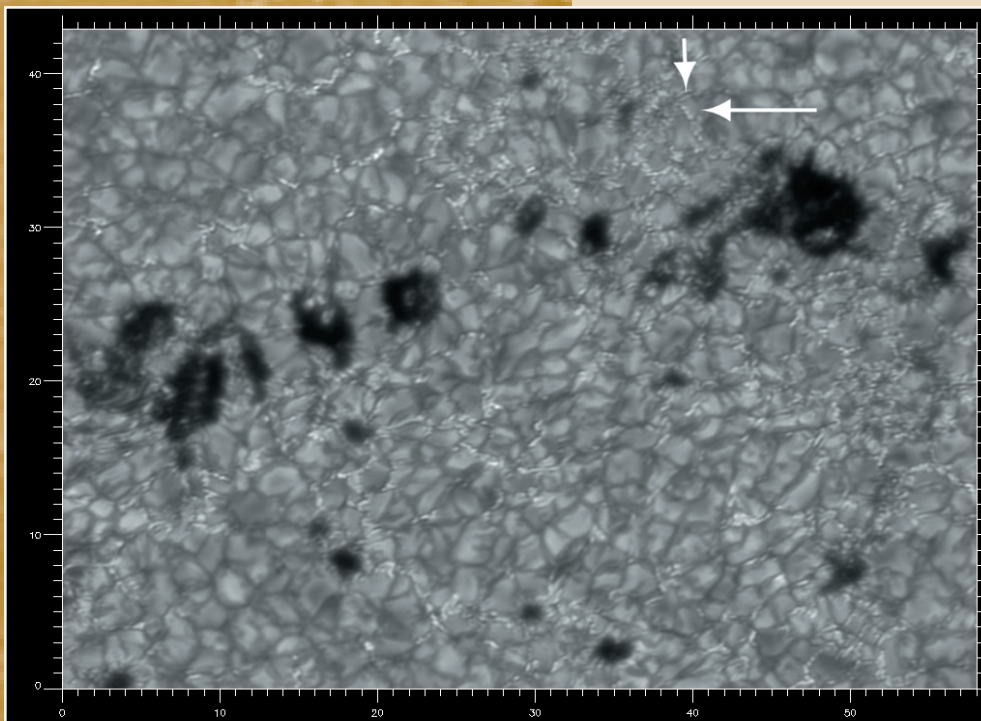
Kijken met de og

**Felix Bettonvil,
Rob Hammerschlag
en
Pit Sütterlin**

Sinds 1997 heeft Nederland een eigen zonnetelescoop op La Palma. Deze 'Dutch Open Telescope', kortweg DOT, is nu de scherpst kijkende zonnetelescoop ter wereld en maakt behalve buigingsbegrenste beelden vooral fantastische films van details op de zon.



Opname in de Fraunhofer G-band (430,5 nm) van de enorme vlekkgroep AR9393, hier dicht bij de zonnerand, die dit jaar gedurende in totaal drie zonneomwentelingen zichtbaar is geweest. De opname werd gemaakt in de ochtend van 2 april en is een mozaïek van in totaal tien (2x5) DOT-beelden dat in totaal 3800x2100 pixels beslaat. Later die dag, om 21.51 UT, veroorzaakte de groep een zonnevlam, de grootste in 25 jaar.



G-band opname van vlekkgroep AR8700 op 19 september 1999. De schalen langs de assen geven de schaal in boogseconden. De pijlen tonen drie heldere dots op een rij en illustreren de kwaliteit van de DOT: ze staan 0,3" uiteen. Let op de talloze kleine heldere puntjes in de donkere lanen tussen de granulen. Het zijn fluxbuizen, waar magnetisch veld door de fotosfeer prikt.

Omdat onze zon zo dichtbij staat, is het de ster die het best in detail te bestuderen is. Dat geldt niet alleen voor de (ruimtelijke) resolutie, ook in het tijdsdomein is er op de zon het meest te zien. De combinatie van beide is ook het uitgangspunt geweest voor de DOT. De DOT heeft een spiegel van 45 cm en dat levert een diffractielimiet op van 0,25". Dat komt overeen met 180 km op het oppervlak van de zon. De geluidssnelheid op de zon bedraagt zo'n 7 km/s en daardoor duurt het minimaal 25 seconden voordat een verandering in structuur zichtbaar wordt. Als we dynamische processen zo gedetailleerd mogelijk willen bestuderen, betekent dit voor de DOT dat elke 25 seconden een opname moet worden gemaakt. Het blijkt niet gemakkelijk de te bereiken kwaliteit daadwerkelijk te halen en de reden daarvan is onze eigen aardse dampkring, die als een slechte en steeds veranderende lens het beeld verslechtert.

Van seeing tot speckle

Waarnemingen in de afgelopen drie jaar laten zien dat het idee achter de DOT bijzonder goed werkt. Dit komt allereerst door het unieke ontwerp van de telescoop, die gebouwd is op een voor de wind open toren en zelf ook zo 'doorzichtig' mogelijk is voor de wind. De wind zorgt ervoor dat de van de opgewarmde grond opstijgende turbulente warme lucht weer met koelere gemengd wordt, met als gevolg een thermisch uniforme luchtmassa en daardoor goede seeing.

Ten tweede komt het door de uitstekende locatie waar de DOT staat opgesteld: een boven de inversie laag uit priemende groene vulkaantop op een klein eiland in de Atlantische Oceaan, ver weg van grote landmassa's en met een overheersend noordoostelijke pas-saatwind. Tot op de dag van van-

en van de DOT

daag is er geen andere gelijkwaardige locatie bekend met eenzelfde dagseeing als La Palma.

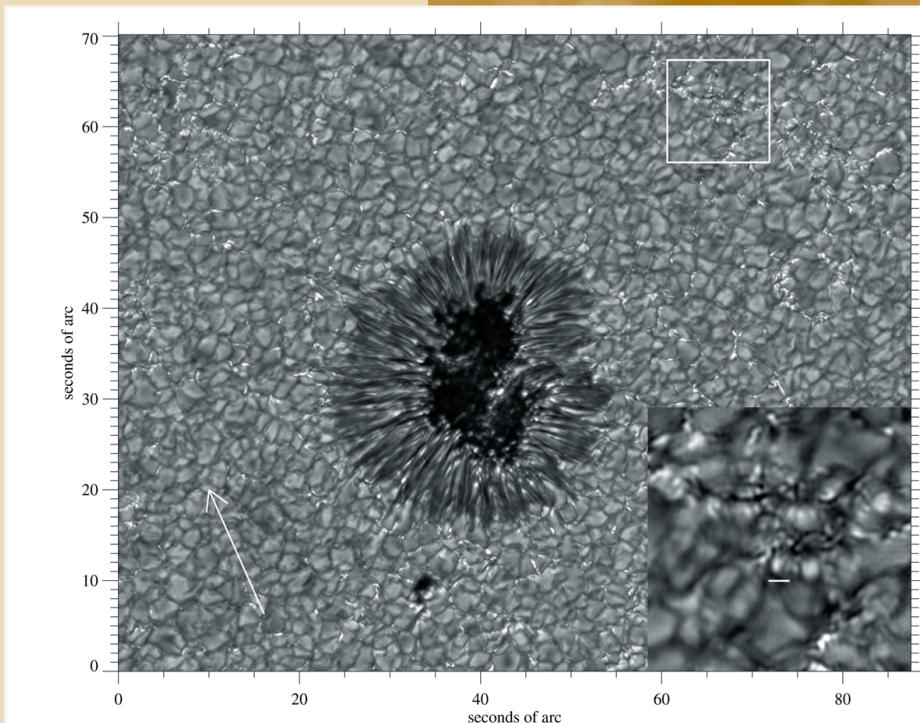
Ten derde maakt de DOT gebruik van de speckle-reconstructietechniek om de resterende onrust uit het beeld te halen. Speckle-reconstructie is een alternatief voor adaptieve optiek en gebeurt in tegenstelling tot adaptieve optiek niet 'on the fly', tijdens de waarneming dus, maar achteraf. Om een goede correctie te bereiken is het nodig heel veel afzonderlijke beelden van het te bestuderen object op te nemen. Elk beeld dient zo kort te worden belicht, dat geen versmering door luchtonrust optreedt. De langst toegestane belichtingstijd bedraagt hiervoor slechts 10 milliseconden. Een afzonderlijk beeld moet nog voldoende signaal bevatten en dat geldt met name voor de fijnste details. Met behulp van een geschikt statistisch model kan de speckle-methode uit de vele opnamen een 'origineel' reconstrueren.

Waarnemingen in de afgelopen drie jaar laten zien dat het idee achter de DOT bijzonder goed werkt.

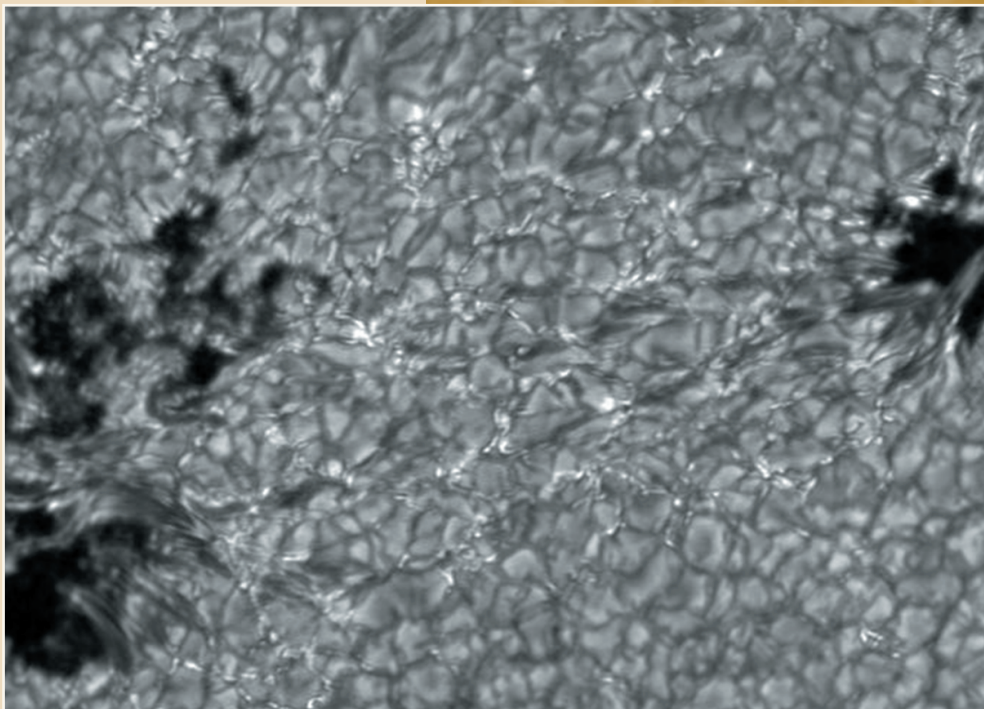
Bij de DOT worden telkens binnen een tijdbestek van 25 seconden honderd afzonderlijke beelden, samen een *burst* genoemd, opgenomen zodat er geen versmering door veranderingen op de zon zelf aanwezig is, maar uitsluitend luchtonrust de oorzaak is van de beeldverslechtering.

Reconstructie

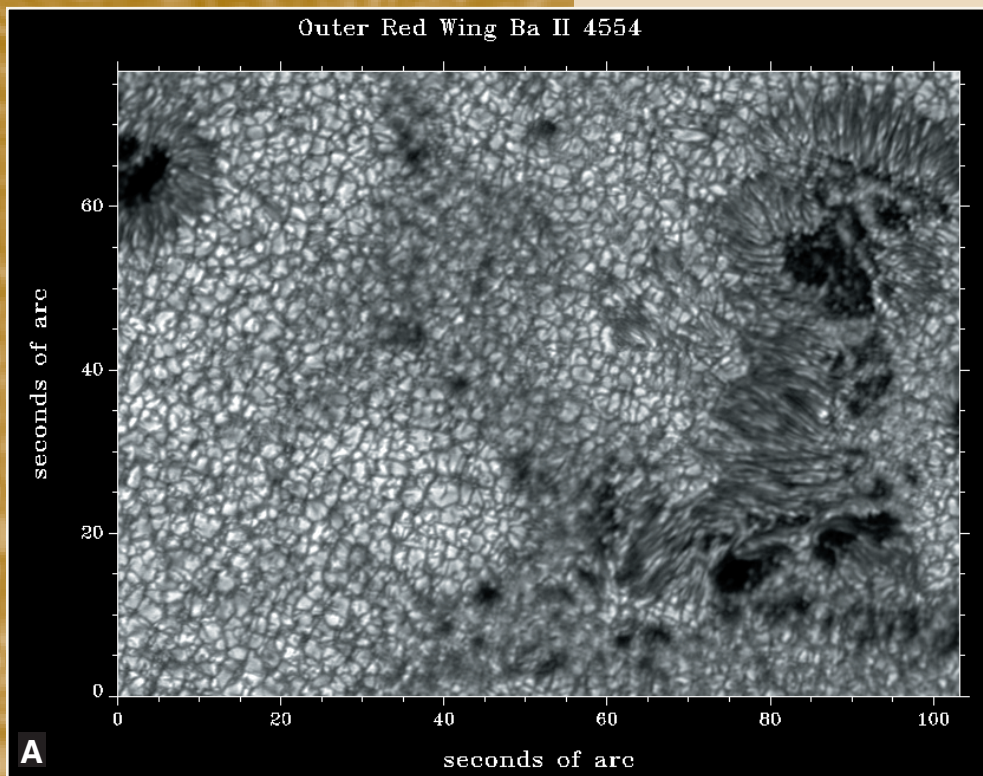
Omdat seeing afhankelijk is van de luchtkolom waar je doorheen kijkt, en deze voor elke kijkrichting verschillend is en zelfs verschillend blijkt voor centrum en hoeken van het beeld, wordt voor de eindreconstructie het beeld in kleine



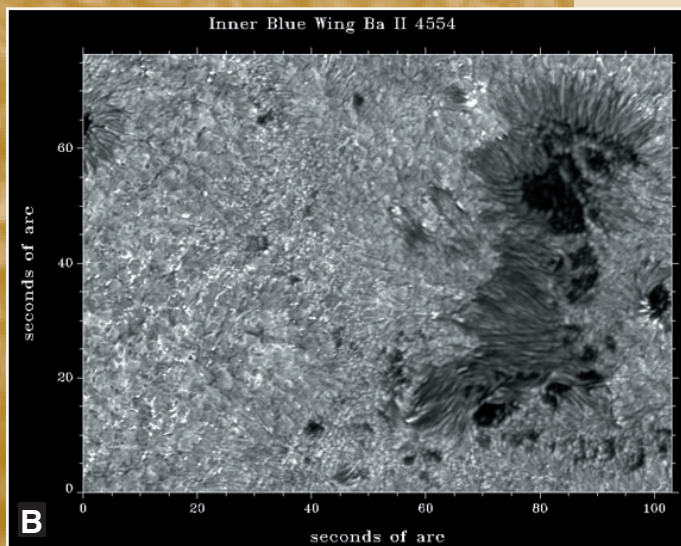
Deze opname toont het eerste resultaat met de nieuwe 1296x1030 camera: AR9407 opgenomen op 1 april 2001 in G-band. Het getoonde beeld meet 87x70", de kleinste details zijn 0,25" groot. De pijl wijst naar het centrum van de zon en het witte kader rechtsboven is onder vergroot weergegeven, het schaalstreepje is 1" groot. Ook in de donkere umbra op de grote foto is structuur te zien. De 1 uur durende film van deze vlek is te zien op <http://dot.astro.uu.nl>.



Deze opname toont een enkel beeld uit een film van AR8737 die gemaakt werd net na het optreden van een zonnevlam op 21 oktober 1999. Het beeld laat fotosfeer zien (G-Band) en bijzonder is het sterk verstoorde granulatiepatroon tussen de vlekken links en rechts in beeld. De film laat heftige bewegingen van de granulatie zien met snelle veranderingen in het fluxbuisenpatroon. Ook de vorm van de granulen is abnormaal.

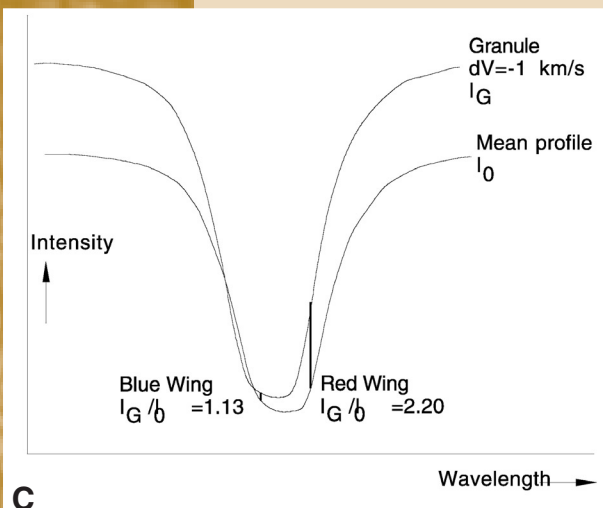


In juli 2000 werden tests gedaan met een in Irkoetsk ontwikkeld smalbandig Lyot-filter voor de Ba-II absorptielijn (455,4 nm). Hiervoor werd de Zweedse zonnetelescoop SVST samen met het DOT speckle-camerasysteem gebruikt. Het filter heeft een breedte van 0,008 nm en is daarmee waarschijnlijk het smalste ter wereld. De ervaringen met het filter zijn dermate positief dat het nu een vaste plaats krijgt in het DOT multi-wavelengthsysteem.



Figuren A en B laten respectievelijk de blauwe en rode vleugel van de bariumlijn zien. Het veld meet 80x60". Opvallend zijn de grote verschillen tussen de rode en blauwe vleugel. De rode vleugel laat zeer duidelijk de granulatie zien, terwijl het contrast van de granulatie in de blauwe vleugel juist heel laag is. Het sterke contrast in de rode vleugel is het gevolg van de correlatie tussen snelheid en intensiteit: in heldere granulen beweegt het gas naar ons toe, en is de golflengte daardoor blauw verschoven, in de donkere lanen tussen de granulen beweegt het van ons af.

Figuur C illustreert deze versterking van het contrast in de rode en vermindering van het contrast in de blauwe vleugel. De onderste curve toont het gemiddelde zonlicht, de bovenste curve het helderder licht van het centrum van de granule, dat bovendien blauw – dat is naar links – verschoven is. Hierdoor treedt voor langere golflengte – dat is in rode vleugel – een groot verschil in intensiteit op met de gemiddelde lichtsterkte. De situatie is omgekeerd als er een omgekeerde relatie bestaat tussen snelheid en intensiteit, dus wanneer heldere structuren juist van ons af bewegen. Dit is het geval voor de vele kleine heldere structuren in de blauwe vleugel (figuur B).



veldjes van vijf bij vijf boogseconden verdeeld die daarna afzonderlijk worden gereconstrueerd. Na reconstructie worden alle subveldjes weer als een puzzel in elkaar geschoven met als resultaat het uiteindelijk volledig voor seeing gecorrigeerde beeld.

In dit opzicht is de speckle-techniek beter dan adaptieve optiek, die in principe slechts voor één enkele 'luchtkolom' (in professionele termen *isoplanatic patch*), kan corrigeren, dus slechts perfect kan zijn voor één enkel subveldje. Keerzijden van de speckle-techniek zijn de korte belichtingstijden en de enorme hoeveelheden data die nodig zijn. De DOT-computers zijn voorzien van harde schijven met een totale capaciteit van 360 Gb en een camera schrijft die in een dag vol.

De 'Dutch Open Telescope', kortweg DOT, is nu de scherpst kijkende zonnetelescoop ter wereld

De eerste waarnemingen werden gedaan met analoge video-camera's en toonden reeds het succes van het DOT-concept. Tegenwoordig worden snelle digitale 10-bit 1296x1030 pixel camera's gebruikt die via een door de Instrumentele Groep Fysica van de Universiteit Utrecht ontwikkelde supersnelle glasvezelverbinding beelden zenden naar de acquisitiecomputers, die staan opgesteld in de Zweedse zonnetoren, zeventig meter van de DOT.

Het multi-wavelengthsysteem

Om de mogelijkheden van de DOT nog verder te kunnen benutten, is besloten de telescoop te voorzien van meerdere camera's die exact tegelijkertijd in verschillende golflengten eenzelfde gebied op de zon kunnen waarnemen. Gelijktijdig waarnemen in meerdere golflengten betekent informatie verzamelen uit verschillende hoogten in de fotosfeer en de (hoger gelegen) chromosfeer, waardoor het mogelijk wordt verbanden te leggen tussen verschillende fysische processen in de

zonneatmosfeer. De combinatie met zowel hoge ruimtelijke als temporele resolutie en het relatief grote veld zijn daarbij uniek. Het camerasysteem bestaat in totaal uit zes camera's.

Deze eigenschappen zorgen ervoor dat de DOT een tomografisch instrument wordt en te gebruiken is voor het beantwoorden van alle vraagstukken waar magnetische topologie een rol speelt: in ruimtelijke schaal van kleine fluxbuizen tot uitgebreide actieve gebieden, in temporele schaal van hoogfrequente oscillaties tot evolutie van actieve gebieden en in dynamisch gedrag van stabiele (maar oscillerende) vlekken tot zonnevlammen, protuberansen en *coronal mass ejections* (CME's).

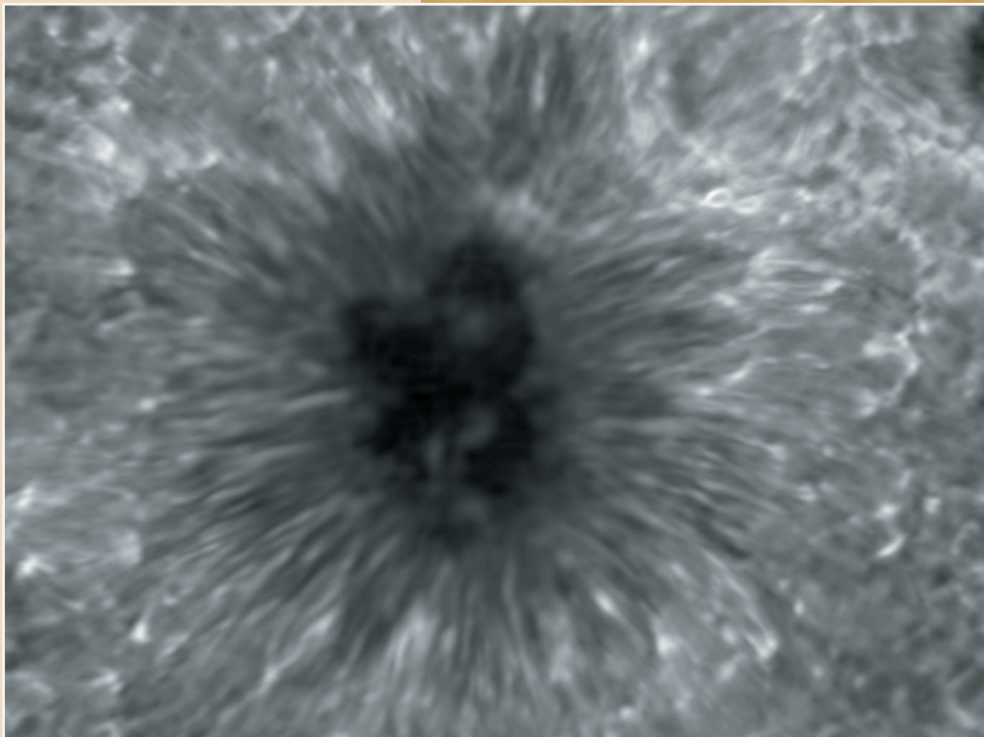
Onmiskenbaar het sterkste punt van de DOT is het kunnen maken van *lange reeksen* buigingsbegrensde opnamen, die als films kunnen worden bekeken. Een in druk verschijnend tijdschrift als Zenit vormt daardoor niet het meest geschikte medium om de resultaten te laten zien. We beperken ons in bijgaand 'fotoalbum' noodgedwongen tot het tonen van geselecteerde beelden uit het DOT-archief, maar het bekijken van de bijbehorende films is eigenlijk een must. Dat kan op de DOT-website:

<http://dot.astro.uu.nl>.

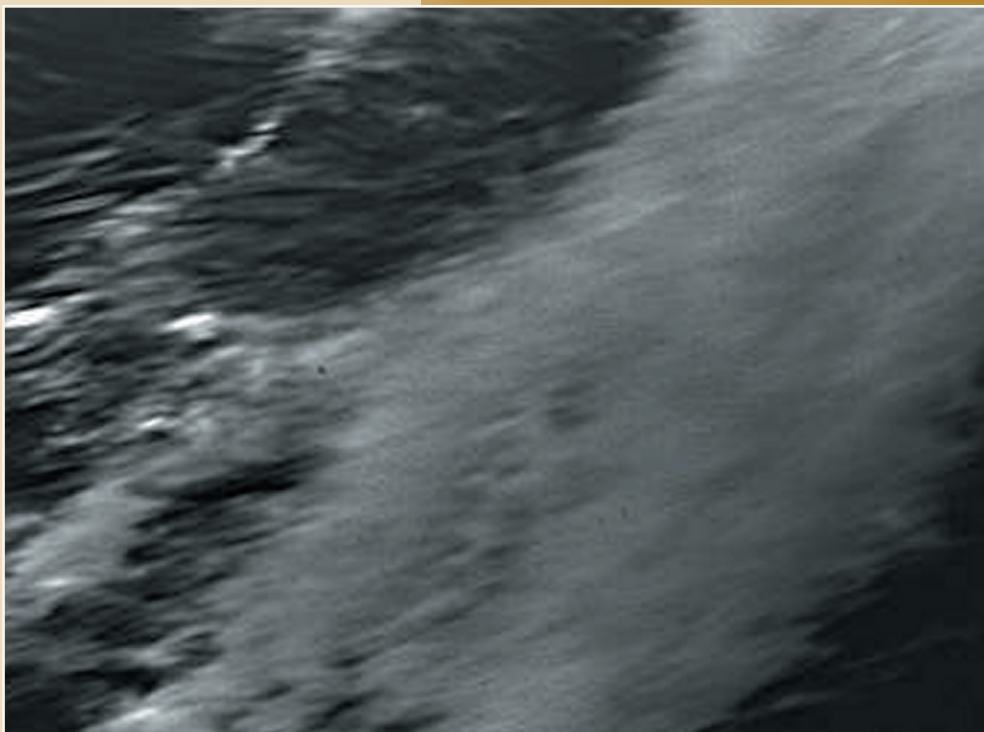
Het multi-wavelength systeem wordt gebouwd door de werkplaats van het Sterrekundig Instituut en de Instrumentele Groep Fysica van de Universiteit Utrecht, die samen met de Centrale Werkplaats van de Technische Universiteit Delft ook de DOT realiseerden. De voltooiing en installatie werden naast de Utrechtse universitaire middelen in belangrijke mate gefinancierd door de Stichting Technologie Wetenschappen STW. Thans ontvangt de DOT bijdragen van de Universiteit Utrecht, NWO, de Nederlandse Onderzoeksschool voor Astronomie NOVA en het Europese Solar Magnetometry Network ESMN. De DOT staat op La Palma onder auspiciën van het Instituto Astrofísica de Canarias en wordt bediend vanuit de Swedish Vacuum Solar Telescope (SVST) van de Zweedse Koninklijke Akademie van Wetenschappen.

Literatuur:

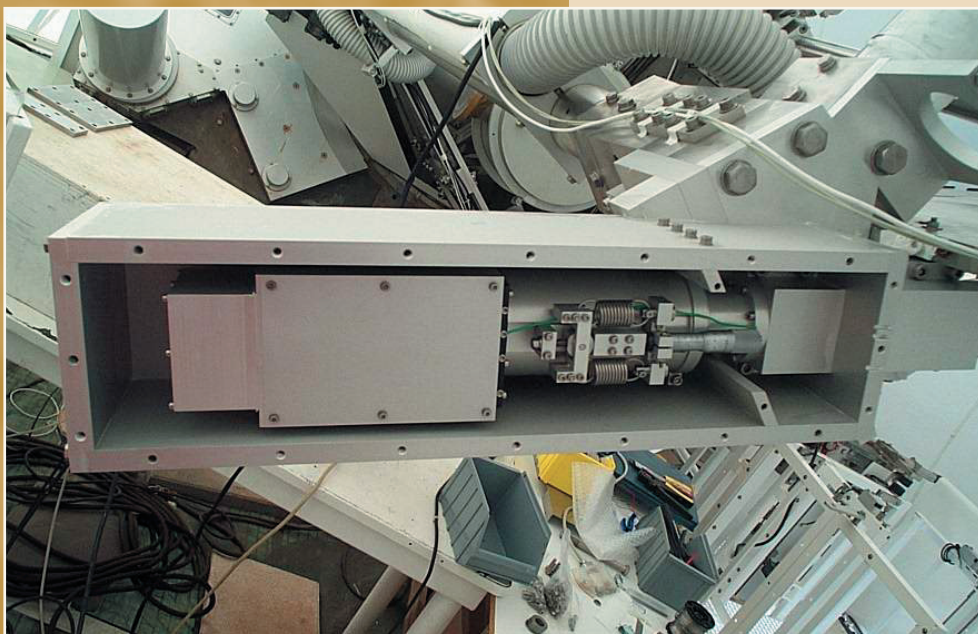
P. Sütterlin, 'The size of penumbral fine structure', 2001, *A&A*, in press.
P. Sütterlin, R.H. Hammerschlag, F.C.M. Bettonvil, R.J. Rutten, V.I. Skomorovsky, G.N. Domyshv, 2001, 'Multi-Channel Speckle Imaging System for the DOT', *Procs. 20th NSO/SP Summer Workshop 'Advanced Solar Polarimetry – Theory, Observation, and Instrumentation'*, Ed. M. Sigwarth, Astron. Soc. Pac. Conf. Series, in press.



Het is ook mogelijk de hogere zonneatmosfeer te bestuderen door een filter te kiezen in een daarvoor geschikte absorptielijn. Met een CaII-H of -K-filter kijken we in de lage chromosfeer, ongeveer duizend kilometer boven het 'oppervlak' van de zon. Deze opname is gemaakt in de CaII-H lijn (396,9 nm). We zien hier geen granulatie meer; de heldere structuren zijn een directe indicatie voor verbitting door magnetisch veld. Films tonen in de umbra snelle bewegingen en flitsen met een periode van ongeveer drie minuten. Ook zijn er radiaal naar buiten bewegende golven te zien, die gezien hun snelheid duiden op schokgolven, en doorgaan tot in de penumbra en incidenteel zelfs tot buiten de vlek. De film suggereert een verband tussen de schokgolven en flitsen. Ook in de lager gelegen fotosfeer zijn heldere punten te zien (umbral dots), maar vooralsnog is geen bewijs gevonden dat zo'n verband bestaat.



Bijzonder spectaculair zijn de waarnemingen van zonnevlammen en protuberansen. In juli 2000 werden als onderdeel van een internationale campagne protuberansen in H-alfa (656,3 nm) opgenomen. De speckle-techniek bleek extreem succesvol in het reconstrueren van de draderige structuren en door de hoge snelheden ogen de films enorm spectaculair. Een van de films, waar deze opname uit gekozen is, laat een ketting van lichtend waterstofgas zien dat uiteenvalt in cyclonisch draaiende wolken. Het beeld meet 288x208 pixels, overeenkomend met 62x45". De zomerand bevindt zich net boven de opname.



Rob Rutten, 'Dutch Open Telescope, spiegel op de tocht', *Natuur en Techniek* **67**, mei 1999, blz. 70-79.

Rob Rutten, Rob Hammerschlag, Felix Bettonvil, 'De Dutch Open Telescope, nieuwe zonnetelescoop op La Palma', *Zenit* **24**, november 1997, blz. 481-485.

F.C.M. Bettonvil en R.H. Hammerschlag, 'De Utrechtse Open Toren Telescoop', *Zenit* **20**, juli/augustus 1993, blz. 327-331.

Montage van de tweede camera in de kop van de telescoop. Voor het bereiken van de hoge beeldkwaliteit is trillen door de wind taboe en daarom is veel aandacht besteed aan stijfheid. Met name in de winter kan het weer op de Palmanese vulkaantop erg ruig zijn en ieder instrument wordt daarom goed 'ingepakt'.



De DOT in bedrijf. Midden in de drieboekige structuur in de kop van de telescoop bevindt zich het primaire brandpunt met een watergekoeld diafragma. De waterkoeling zorgt samen met luchtafzuiging (door de slangen rechts in beeld) dat de temperatuur in het brandpunt niet meer dan 0,1 °C afwijkt van de omgevingstemperatuur.



Gezicht op de 15 m hoge toren met de kabelpijp die de telescoop met de DOT-controlekamer in de Zweedse SVST verbindt. De rechtsonder zichtbare witte kast staat halverwege DOT en SVST en bevat de watertank met koelvloeistof voor het primaire brandpunt.