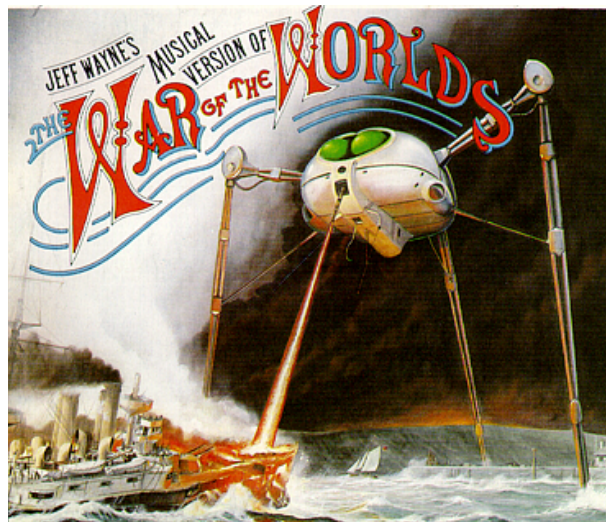


Zonsonderzoek met de DOT

De Dutch Open Telescope is een nieuwe zonnetelescoop van Utrechtse makelij die recent is geïnstalleerd op het Canarische eiland La Palma. Hij is geheel open, een revolutionair concept, en levert daardoor uitzonderlijk hoge beeldscherpte. In dit artikel een korte schets van de onderzoeken die de komende jaren met de DOT gedaan gaan worden en van wat daarvoor aan hardware en software ontwikkeld wordt.



Figuur 1: Zonsonderzoek op hoge poten versus wereldoorlog op hoge poten.

Open telescoop

De DOT is de eerste zonnetelescoop die een nieuw principe uitprobeert: dat van de geheel open telescoop waar de wind dwars doorheen waait. Hij lijkt helemaal niet op klassieke koepelomhulde telescopen, meer op een Martiaan uit H.G. Wells' beroemde boek (figuur 1). In plaats van mensdodende stralen uit te zenden ontvangt hij echter stralen, die van de zon, ter lering van de mensheid. Registratie daarvan met voldoende scheidend vermogen geeft ons de mogelijkheid meer te weten te komen van de enige ster die we in detail kunnen bestuderen (de volgende staat 3×10^5 maal verder).

Het principe van de DOT heb ik al uitvoerig in *De Vakidoot* beschreven (jaargang 1996–1997 nr. 6). Kort samengevat: het probleem bij zonnetelescopen is dat de zonnestraling in de telescoop wordt samengebondeld en daar sterke verhitting levert, met turbulentie als gevolg. Om die reden worden alle zonnetelescopen van de laatste decennia vacuum gezogen, maar dat levert als probleem dat het intredevenster waarmee de telescoop dan moet beginnen onder het drukverschil binnen–buiten van één atmosfeer vervormt, hetgeen de afbeeldingskwaliteit bederft. Daarnaast levert de verhitting van het telescoopgebouw en van de grond

rondom door de zon convectieve turbulentie die vaak tientallen meters opstijgt. De meeste zonnetelescopen leveren daarom alleen maar scherpe beelden gedurende het eerste uur na zonsopkomst.

De DOT daarentegen is volledig open en staat op een plaats waar de heersende passaatwinden zowel krachtig plegen te zijn als tamelijk laminair omdat ze van over de oceaan komen aanwaaien; dat maakt de Roque de los Muchachos, de 2300 m hoge top van de uitgedoofde vulkaan die La Palma domineert, tot de beste tot dusver bekende locatie voor zonswaarnemingen. De grondconvectie blijft op La Palma bij voldoende windsterkte (5–10 m/s) beperkt tot een laag van slechts zo'n tien meter dik. De vijftien meter hoge steltpoten van de DOT steken daar boven uit en verstoren de passaat maar weinig. Die blaast ook dwars door de telescoop en houdt hem schoon van wervels, met name door de lucht vlak boven de hoofdspiegel gedurig te verversen ("mirror flushing").

Dankzij dit principe, en ook dankzij het feit dat de optische lichtweg van de DOT uitzonderlijk eenvoudig is zodat er relatief weinig problemen zijn met de uitlijning van de componenten, is de beeldscherpte die de DOT haalt fenomenaal — dicht bij het theoretisch scheidend vermogen van de telescoop (0.22", bepaald door de spiegel diameter van 45 cm) bij goede waarnemingsomstandigheden. De eerste beelden van de DOT, al kort na de "First Light Ceremony" door Prins Willem-Alexander, hebben dat aangetoond. Je kunt ze aanklikken op de DOT website¹.

¹<http://www.astro.uu.nl/~rutten/dot/>

²Cornelis ("Kees") Zwaan (1928–1999) was van 1968 tot 1993 lector, resp. hoogleraar aan Sterrenwacht Sonnenborgh, resp. het Sterrekundig Instituut Utrecht. Hij overleed op 16 juni van dit jaar. Zwaan was een internationaal befaamd zonnepysicus die zich vooral toelegde op de magnetische activiteit van de zon en van soortgelijke koele sterren. Zijn onderzoek bestreek vrijwel alle facetten van dit rijke onderwerp. Hij was een uitstekend docent en liet een uitzonderlijk grote "school" van leerlingen na — van zijn achttien promovendi zijn er dertien in de sterrenkunde werkzaam (elf buitenslands). Veel van zijn onderzoek is samengevat in het boek *Solar and Stellar Magnetic Activity* dat hij kort voor zijn dood voltooide, met zijn leerling C.J. Schrijver (Lockheed-Martin, Palo Alto). Het verschijnt dit najaar bij Cambridge University Press.

Made in Utrecht

Hoewel de DOT "Dutch" in zijn naam heeft en is geassembleerd in de Centrale Werkplaats van de TU Delft is hij een produkt van Utrechtse bodem. Met de "Utrecht Echelle Spectrograph" op de WHT (figuur 2) Utrechtse aanwezigheid op de belangrijkste sterrenwacht in Europa waar we trots op kunnen zijn.

De bouw van de DOT heeft lang geduurd, langer dan ik en vele anderen wel hadden gewild, maar het eindprodukt ligt er niet om. De aanzet kwam van Prof. C. Zwaan² die zich al in de zeventiger jaren realiseerde dat zonnetelescopen beter open kunnen worden gebouwd dan vacuumgezogen. Hij was intensief betrokken bij de toenmalige testcampagnes van de gezamenlijke Europese zonnepysici die onder aanvoering van K.O. Kiepenheuer (Freiburg) en C. de Jager (Utrecht) op zoek waren naar de beste locatie in Europa. Uit proefmetingen op dozijnen plaatsen in en rond de Middellandse Zee kwam La Palma als beste te voorschijn.

Zwaan overtuigde Ir. Rob Hammerschlag van de waarde van het open concept. Die was door de hoogleraar laboratorium-astrofysica H.G. van Bueren aangetrokken om te helpen bij heterodyne detectie in het infrarood, een techniek die pas veel later in Groningen door de uit Utrecht afkomstige onderzoekers Th. de Graauw en H. van de Stadt tot wasdom is gebracht. Onder Van Bueren kwam er niet veel van terecht en Hammerschlag zag meer toekomst in Zwaans idee. De verwezenlijking was een lange weg, met als voornaamste moeilijkheid dat een open telescoop in harde wind bijzonder stijf moet zijn om niet te wiebelen, maar wel de zon



Figuur 2: De DOT en de William Herschel Telescope (WHT) op La Palma. Ze schelen een factor tien in spiegeldiameter, de een is open (hier niet, de DOT koepeltent is op deze foto gesloten) en de ander heeft een enorme koepel — maar beide beogen ze hoge beeldscherpte, en beide vormen ze vlaggeschepen van de Nederlandse sterrenkunde. De WHT is de grootste van de drie telescopen van de Isaac Newton Group waarin Nederland voor 15% participeert. Mijn naamgenoot René Rutten, ook een Utrechts produkt uit de school van C. Zwaan, is directeur van de ING.

met grote precisie langs de hemel moet volgen. Hammerschlag heeft daarvoor drijfwerken ontwikkeld die voor de Stichting Technische Wetenschappen voldoende interessant waren het project te financieren toen de universitaire geldbronnen opdroogden.

Nu staat de DOT dan tenslotte op La Palma. Qua benodigde mankracht en kosten heeft het project altijd op de grens van het in Utrecht mogelijke gebalanceerd, maar in internationale maat is het kleinschalig en goedkoop. De gloednieuwe Frans-Italiaanse THEMIS op Tenerife bijvoorbeeld is ordes van grootte duurder (en nam net zo lang) — maar haalt tot dusver bij lange na de beeldscherpte van de DOT niet, en ik vraag me af of dat ooit zal gebeuren.

Drie-jaar-programma

Momenteel loopt dankzij steun van het Sterrekundig Instituut Utrecht, de Faculteit Natuur- en Sterrenkunde van de UU, het Gebiedsbestuur Exacte Wetenschappen van NWO, de Nederlandse Onderzoeksschool voor de Astronomie NOVA en het TMR programma van de EC een driejarig programma waarin het DOT team (Rob Hammerschlag, Felix Bettonvil, Ed van der Zalm, Thijs Krijger, Pit Sütterlin en mijzelf van het Sterrekundig Instituut, Piet Hoogendoorn en anderen van de IGF, aangevuld met studenten en technische stagiaires) kan laten zien dat de telescoop geschikt is voor frontlijn-onderzoek. Daarvoor is een tweeledig programma opgesteld:

- installatie van drie-kanaals afbeelders voor tomografische magnetografie;
- ontwikkeling van spikkelreconstructie.

Daarmee veroverft de DOT zich een unieke *niche* in de zonnefysica: met uitzonderlijk hoge ruimtelijke resolutie de evoluerende topologie van het zonnemagneetveld registreren op drie verschillende niveaus in de zonneatmosfeer:

- de diepe fotosfeer, waarin turbulente convectorie en stralingsverliezen samen de granulatatie veroorzaken en overheersen over het magnetisch veld, behalve in de heel dunne veldbuizen van 1400 Gauss (2000 maal sterker dan het aardmagneetveld) die erdoorheen naar buiten steken;
- de lage chromosfeer, waarin de veldbuizen tot groepjes combineren en helder worden door (onbegrepen) mechanische verhitting;
- de hoge chromosfeer, waarin het veld in lus-achtige structuren over grote gebieden uitwaaiert, alle gasstromingen reguleert, en dynamische topologieveranderingen ondergaat die zonnevlammen en andere spectaculaire verschijnselen leveren.

Tomografische magnetografie

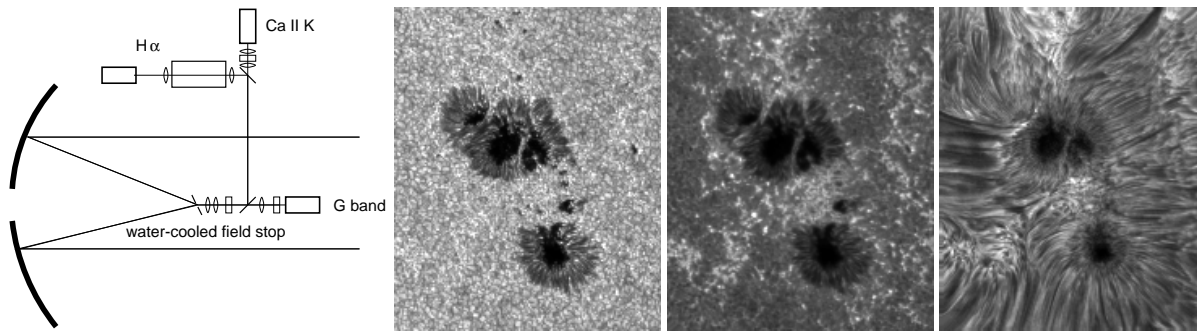
Het optische schema van de DOT is eenvoudig (figuur 3): een parabolische vangspiegel van 45 cm doorsnede en 200 cm brandpuntafstand projecteert een primair zonsbeeld op een klein (1.5 mm) gaatje dat het te onderzoeken deel doorlaat. Het zit in een spiegeltje dat het overige beeld de telescoop uit kaatst om lokale verhitting te vermijden; bovendien wordt het spiegeltje met waterkoeling op de omgevingstemperatuur gehouden. Daarachter volgt navergroting en beeldregistratie. In de nu in aanbouw zijnde secundaire optiek

wordt de bundel gesplitst zodat een deel beziijden de inkomende bundel kan worden verwerkt, waar meer plaats is. De beeldregistratie zal gebeuren op drie golflengten tegelijk:

- G-band ($\lambda = 430.5$ nm): een 1 nm brede band tjokvol spectraallijnen van het moleculair CH. Opnamen daarin tonen de lage fotosfeer (onderste deel van de zonsatmosfeer) waarin de granulatatie zichtbaar is, en daartussen als heldere puntjes de kleine magnetische veldbuisjes die vanuit het zonsinwendige naar buiten prikken. Dit zijn de fundamentele bouwstenen van het zonsmagnetisme.
- Ca II K (393.3 nm): de sterkste spectraallijn in het zichtbare deel van het zonnespectrum (in practicum DPST zul je uitrekenen waarom). Opnamen in deze lijn tonen de lage chromosfeer. Daarin voegen de veldbuisjes zich samen tot grotere clusters die geordend zijn in het chromosferisch netwerk.
- H α (656.3 nm): de sterkste zichtbare lijn van waterstof, het meest voorkomende element. Deze lijn toont de hoge chromosfeer, waarin het magnetisch veld uitwaaiert in rozet-achtige draderige structuren. Op dit niveau is het gas geïoniseerd zodat de stromingen langs de veldlijnen lopen.

Figuur 3 toont voorbeelden van deze drie diagnostieken gemaakt met de Zweedse telescoop op La Palma. De DOT staat er vlak naast en wordt vanuit het Zweedse gebouw bediend, in hechte samenwerking met de Zweedse collega's en de zonnefysici van Lockheed-Martin te Palo Alto (waar vier oud-Utrechters werken). Zulke drie-kanaalstomografie van de zonneatmosfeer is een ideale manier om de magnetische topologie en de evolutie ervan in beeld te brengen wat betreft de lagere regionen van de zonneatmosfeer. Hogerop, in de corona, gebeurt dat met Röntgenstralingskijkers in de

³<http://www.lmsal.com/TRACE>



Figuur 3: Magnetische tomografie van de zonneatmosfeer. Links: schema van de DOT optiek voor gelijktijdige drie-kanaals beeldregistratie. Rechts: zonsbeelden gemaakt door Tom Berger (Lockheed-Martin) met de Zweedse zonnetelescoop, resp. in de G-band, Ca II K en $H\alpha$ (<http://www.lmsal.com/~berger>). Ze tonen de topologie van het magneetveld rondom het actieve gebied met vlekken: links de fotosferische veldbuisjes als heldere spikkels, in het midden het chromosgerisch netwerk (waarop Mandy Hagenaar in mei promoveerde), rechts het uitwaaiierend veld hogerop in de chromosfeer.

ruimte, zoals die in TRACE³. De DOT zal vooral in campagnes samen met zulke ruimtekijkers worden gebruikt.

Spikkelreconstructie

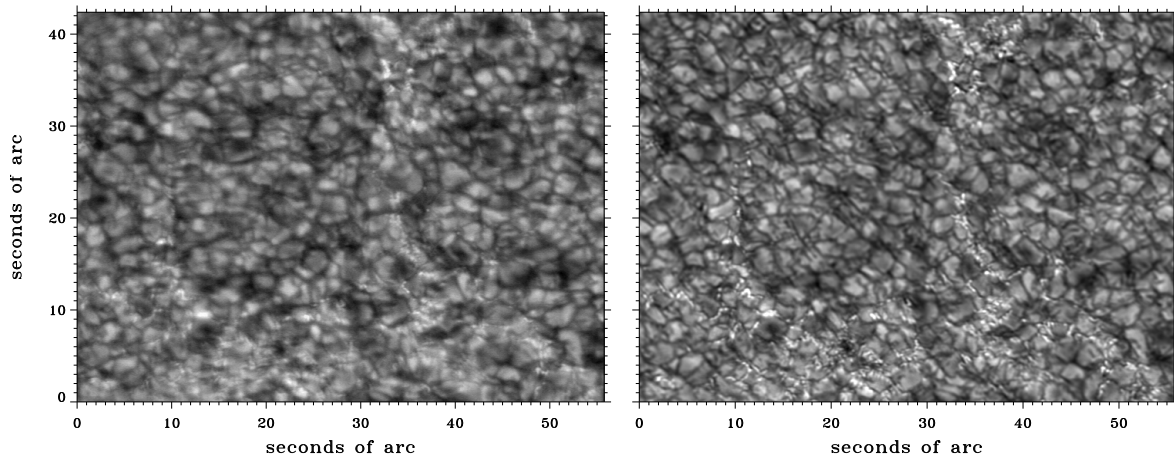
Goede waarnemingsomstandigheden betekenen niet alleen een heldere hemel (op La Palma vaak het geval ook al is het op zee bewolkt; die bewolking blijft dan onder de inversielaag honderden meters beneden de telescoop) maar vooral ook goede "seeing", de beeldverwaziging die wordt veroorzaakt door turbulentie in de aardse dampkring rond en boven de telescoop. Met zijn open structuur minimaliseert de DOT de nabije turbulentie maar we kunnen niet veel doen aan de kilometers lucht erboven. Boven La Palma is die doorgaans relatief ongestoord omdat de straalstromen op noordelijker breedtes blazen, maar niettemin blijft de seeing er vaak slechter dan de DOT buigingsgrens. Ook als is La Palma de beste plaats die we kennen, seeing van $0.2''$ overdag komt ook daar maar zelden voor.

Wat doen we er aan? Er zijn twee mogelijkheden: real-time correctie van het binnenkomende golffront met adaptieve optiek, en post-detectie correctie per computer. De eerste techniek is wereldwijd volop in ont-

wikkeling maar werkt nog nergens echt goed. De tweede techniek is al jaren bewezen maar nergens dagelijks in gebruik omdat daarvoor grote verwerkingscapaciteit is vereist.

In het drie-jaar-programma voor de DOT wordt geprobeerd de tweede techniek zo ver te ontwikkelen dat meer dan een enkele waarnemingsreeks per jaar kan worden verwerkt. Het voordeel is dan dat, in tegenstelling tot adaptieve optiek, het hele beeldveld kan worden aangescherpt in plaats van alleen maar een "isoplanatic patch" van slechts enkele boogseconden. Dit gebeurt door eerst het hele beeldveld op te splitsen in aparte "patches" die elk worden gereconstrueerd. Dat kan parallel en daarom is er hoop op aanzienlijke versnelling van de computerreductie.

Figuur 4 toont een voorbeeld van DOT spikkelreconstructie. Het voert te ver om hier de techniek uit te leggen, maar vergelijking van beide beelden maakt duidelijk dat het gewenst is altijd zulke kwaliteitswinst te boeken. In samenwerking met Paul van Haren van de IGF wordt op het moment uitgezocht hoe dat moet. Het wetenschappelijk rendement zal hoog zijn omdat het dan mogelijk wordt de veldtopologie gedurende uren te volgen met de resolutie die nu alleen mo-



Figuur 4: Allereerste spikkelreconstructie met de DOT, door Peter (“Pit”) Sütterlin. In mei nam hij bij middelmatige seeing een “speckle burst” op van zestig videobeelden, door een G-band filter, elk met een belichtingstijd van 0.1 ms, tezamen een minuut bestrijkend. Binnen die tijd verandert de zonsatmosfeer niet erg; de wisselende kwaliteit van de beelden is het gevolg van turbulentie in onze eigen dampkring. Links het beste beeld uit de burst. Rechts het resultaat van Pits spikkelreconstructie aan de hand van alle zestig beelden. Het toont de fotosferische veldbuisjes als witte spikkels tussen de granulen die convectief ontstaan. De reconstructie levert resolutie nabij de buigingsgrens, veel beter dan de seeing op dat moment. Deze beelden zijn ook aanklikbaar op de DOT website en tonen op een scherm veel beter dan op dit papier.

mentaan wordt bereikt. De gegevensstroom is echter immens: een uur of vier spikkel-data verzamelen op de gewenste vier golflengten tegelijk levert zo’n 250 Gbyte aan ruw beeldmateriaal ter reconstructie. Dames en heren informatici onder de Vakidioten — wilt u even komen helpen?

Werk aan de winkel

Er is hier geen plaats om de belangrijke rol te illustreren die het zonnemagnetisme speelt in de sterrenkunde, in de plasmafysica, en in de zon-aarde relaties inclusief de invloed van de zonneactiviteit op ons klimaat. Laat ik besluiten met de constatering dat er van het zonnemagnetisme nog heel veel niet begrepen is. De klassieke “grote” vragen — de

werking van de zonnedynamo, de topologische discretisatie van de veldstructuur, het hoe en waarom van zonnevlammen, de verwarming van de corona, de chemische samenstelling van de zonnewind — staan nog allemaal open. Nieuwe telescopen op de grond zoals de DOT, en in de ruimte zoals Solar-B (lancering over een jaar of vier) kunnen aan de beantwoording bijdragen. Mits er goedge-schoolde onderzoekers zijn om dat te doen. De Utrechtse opleiding sterrenkunde is de meest diepgaande in Nederland en de enige met stevige doses stralingstransport, MHD en plasmafysica: de natuurkunde die nodig is om het zonnemagnetisme te begrijpen. De uitdaging is aan jullie!

Rob Rutten