

Verblind door de (radio) zon

- **Reconnecties van magneetvelden op de zon leiden tot energierijke verschijnselen zoals zonnevlammen en coronale massa-uitstotingen.**
- **Dergelijke uitbarstingen kunnen het radioverkeer op aarde verstoren, sensoren van satellieten beschadigen en elektriciteitsnetwerken overbelasten.**
- **Het toekomstige DISTURB-systeem moet de zon continu op een groot aantal radiofrequenties bewaken om tijdig te kunnen waarschuwen voor gevaarlijke zonne-uitbarstingen.**

Hevige zonne-uitbarstingen kunnen op aarde grote gevolgen hebben, zoals het verstoren van radarsystemen, GPS-ontvangers en radioverbindingen. S&T, ASTRON en het KNMI werken daarom aan het ontwikkelen van DISTURB, een radiotelescoop die zonne-uitbarstingen gedetailleerd in *real-time* kan waarnemen en daardoor in staat is snel alarm te slaan bij radioverstoreningen door deze uitbarstingen. Onlangs werd de ontwerpfase van DISTURB afgerond.

Door Michiel Brentjens (ASTRON)

Het is 23 mei 1967 en Oost en West zijn verwikkeld in de Koude Oorlog. De dreiging van een atoomoorlog is reëel. De Verenigde Staten en de Sovjet-Unie beschikken over geavanceerde detectiesystemen om in de gaten te houden of ze door de ander met kernwapens worden aangevallen. Iets na lunchtijd in de VS worden de radars van het Amerikaans-Canadese Ballistic Missile Early Warning System tegelijk verblind. Een dergelijke *jamming*-actie werd algemeen verwacht als de eerste fase van een grootschalige Sovjetkernaanval en daarmee gezien als een oorlogsdaad. Het Amerikaanse Strategic Air Command brengt de vloot nucleaire lange-afstandsbommenwerpers in de hoogste staat van paraatheid, in afwachting van het definitieve bevel van president Johnson voor een tegenaanval. Met nog een paar minuten te gaan, merken enkele medewerkers van de Amerikaans-Canadese luchtverdediging op dat het Sagamore Hill Radio Observatory aangeeft dat de zon op dat moment een van de helderste uitbarstingen van radiostraling ooit ondergaat, die de radars kan verblinden. Dat betekent dat er waarschijnlijk helemaal geen Sovjetaanval gaande is! Door doortastend handelen weten zij deze

informatie net op tijd in het Witte Huis te krijgen, waarmee een totale nucleaire oorlog wordt afgewend. Achteraf bleek de situatie zelfs nog veel riskanter te zijn geweest. De zonnevlam had ook een heftige stroom geladen deeltjes op de aarde afgestuurd. Die zorgde ervoor dat een paar uur later alle lange-afstandsradiosignalen in het poolgebied werden geabsorbeerd. Als de bommenwerpers al onderweg waren geweest, hadden ze nooit meer teruggeroepen kunnen worden.

Ruimteweer

Dit (bijna-)incident was het gevolg van een radio-uitbarsting op de zon (*Solar Radio Burst* of *SRB*): een van de vele aspecten van ruimteweer. 'Weer' in de ruimte? Jazeker! De ruimte in ons zonnestelsel is niet leeg, maar gevuld met een ijl gas dat met enkele honderden kilometers per seconde van de zon wegwaait: de *zonnwind*. De zonnwind gedraagt zich heel anders dan de wind op aarde. Ze bestaat namelijk niet uit neutraal gas, maar uit geladen deeltjes zoals elektronen, protonen en heliumkernen. We noemen een dergelijk gas een *plasma*. Omdat het uit geladen deeltjes bestaat, geleidt het elektriciteit en beïnvloeden magneetvelden de beweging van geladen deeltjes (bij lage dichtheid) of omgekeerd (bij hoge dichtheid).



Figuur 1. Impressie van DISTURB. (ASTRON)

Mede hierdoor zijn magneetveld en plasma aan elkaar gekoppeld. Stroomt het gas weg, dan neemt het het magneetveld mee. Die koppeling tussen magneetveld en gas is goed te zien in Figuur 2. De zonnwind zal dus magneetveld van de zon meenemen verder het zonnestelsel in, bijvoorbeeld naar de aarde. Normaal is dat geen probleem omdat de gasdichtheid van de zonnwind laag is en het magneetveld zwak en relatief chaotisch. Op de zon kan door gasstromen het magneetveld geconcentreerd raken op één plek. Daar blokkeert het magneetveld het hete, opborrelende gas van onder. Eenmaal afgesneden van de warmtebron koelt het zonnoppervlak ter plaatse af en straalt het minder licht uit. Er ontstaat dan een zonnevlek.

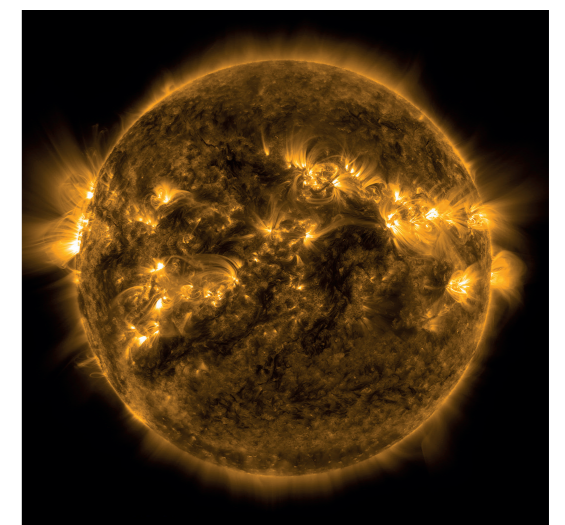
Zonnevlammen en CME's

De magneetvelden in zo'n zonnevlek kunnen zo complex worden dat ze vrijwel letterlijk in de knoop raken: de magneetveldlijnen kruisen elkaar dan en kunnen zich dan zodanig opnieuw rangschikken dat er weer twee nieuwe sets veldlijnen ontstaan die elkaar niet meer kruisen. Bij zo'n *magnetische reconnectie* komen enorme hoeveelheden energie vrij en neemt de temperatuur met tientallen miljoenen graden toe: een *zonnevlam*. Vaak is een zonnevlam door de enorme hitte goed te zien in ultraviolet licht of röntgenstraling. De krachtigste zonnevlammen zijn ook in wit licht waarneembaar, zoals die van 23 mei 1967 of die van het zogenaamde

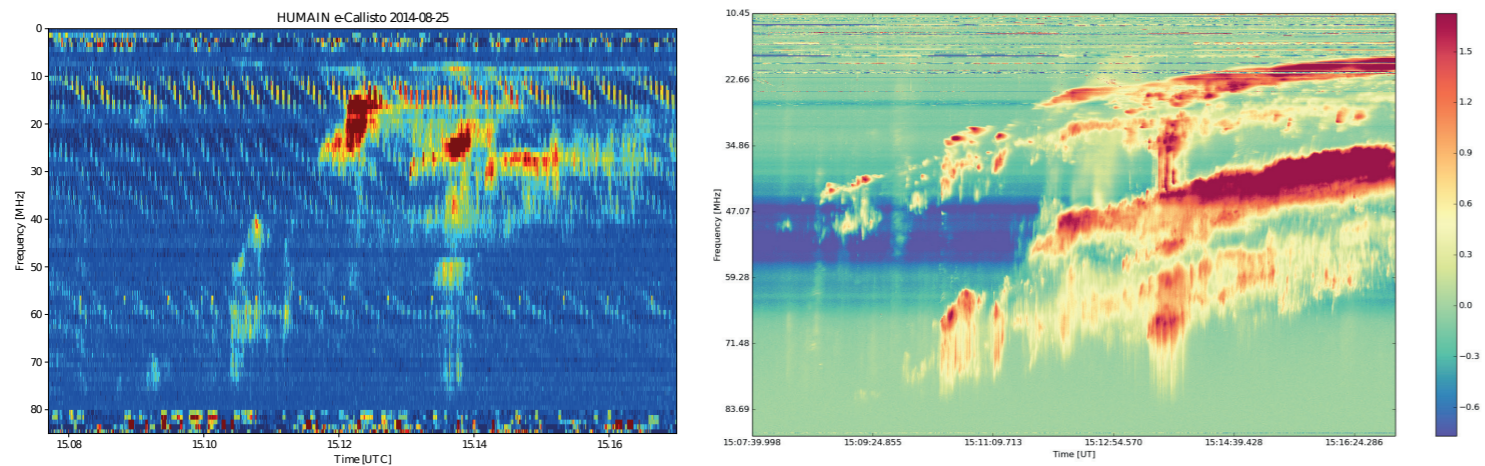
Carrington Event, op 1 september 1859 gezien door de Engelse sterrenkundige Richard Carrington. De intense röntgenstraling ioniseert en verstoort de bovenkant van onze atmosfeer (de ionosfeer) en kan sensoren van satellieten beschadigen. De ionosfeer is van grote invloed op radiocommunicatie. Als hij te dicht wordt, wordt radiocommunicatie van en naar de ruimte ernstig gehinderd. Omdat magnetische reconnecties met enorme elektrische stromen gepaard gaan, werkt de zon dan als een extra krachtige radiozender. Zij kan dan tot enkele miljoenen keren meer radiostraling uitzenden dan normaal: een SRB.

Tijdens de reconnectie van de magneetvelden worden soms protonen en andere geladen deeltjes versneld. Protonen schieten met een snelheid van wel 50 miljoen km/uur (zo'n 5% van de lichtsnelheid) van de zon weg! Een dergelijke 'protonenstorm' kan al binnen drie uur bij de aarde arriveren en, net zoals in 1967, alle kortegolf-radioverkeer in de poolgebieden blokkeren. Het nieuw gevormde setje magneetvelden heeft in eerste instantie een onnatuurlijke vorm en staat onder hoge (magnetische) spanning. Om dat op te heffen, veert het plasma hard naar buiten. Dit proces heet een coronale massa-uitstoot (*Coronal Mass Ejection* of *CME*) en kan grote hoeveelheden relatief dicht plasma met sterke magneetvelden ver het zonnestelsel in slingeren (zie de afbeelding op blz. 11). De CME vormt een supersonische schokgolf in het interplanetaire medium (de

'reguliere' zonnwind), vergelijkbaar met de schokgolven die zich in onze aardse dampkring bij grote explosies voordoen, zoals bijvoorbeeld de vuurwerkcramp in Enschede en recenter de explosie in de haven van Beiroet. Zodra die schokgolf bij de aarde komt, ontstaat een geomagnetische storm. Ondanks dat de ionosfeer voor kortere golven (onder andere GPS-signalen) transparant is, zorgt een CME-schokgolf voor turbulentie waardoor radiosignalen van buiten de dampkring gaan twinkelen. Dat is vergelijkbaar met sterren die last hebben van *seeing*. Door deze 'radio-seeing' kunnen GPS-satellieten ogenscheinlijk op de verkeerde plaats staan, opsplitsen, of zelfs tijdelijk onzichtbaar worden. Een geomagnetische storm kan daarnaast door



Figuur 2. Heet plasma dat uv-straling uitzendt, volgt de magnetische veldlijnen van actieve gebieden op de zon. (NASA/SDO)



Figuur 3. Vergelijking tussen e-Callisto-gegevens (links) en LOFAR-gegevens (rechts). Verticaal is de radiofrequentie weergegeven, horizontaal de tijd. De kleur geeft de helderheid aan: rood is helder, blauw zwak.

inductie (hetzelfde mechanisme als de kookplaat of de draadloze telefoonoplader) stroom opwekken in elektriciteitsnetwerken en grote pijpleidingen. Als de polariteit van het magnetveld in de CME tegenovergesteld is aan die van het aardmagnetveld kunnen die stromen zelfs zo groot worden dat hoogspanningstransformatoren smelten. Dat is in 1989 daadwerkelijk in Canada gebeurd.

Een geomagnetische storm heeft ook zijn mooie kanten. Juist in het geval van een tegengestelde polariteit van het magnetveld in de CME en het aardmagnetveld wordt 'magnetisch schild' van de aarde verzwakt en kunnen snelle geladen deeltjes van de zonnwind via de magnetosfeer van de aarde ook op lagere breedtegraden diep in de dampkring doordringen. We kunnen dan genieten van spectaculair noorderlicht.

Waarschuwingssystemen

Voor de meeste ruimteweer-effecten bestaan al goede waarnem- en waarschuwingssystemen: satellieten monitoren de zon van infrarood via zichtbaar licht en ultraviolet tot röntgenstraling. Het interplanetaire medium op ongeveer 45 minuten 'bovenwinds' van de aarde wordt iedere seconde bemonsterd door de NOAA/DSCOVR-satelliet. Zodra die de schokgolf van een CME waarneemt, is er nog 45 minuten tijd voordat de schokgolf de aarde raakt. Net voldoende om te waarschuwen.

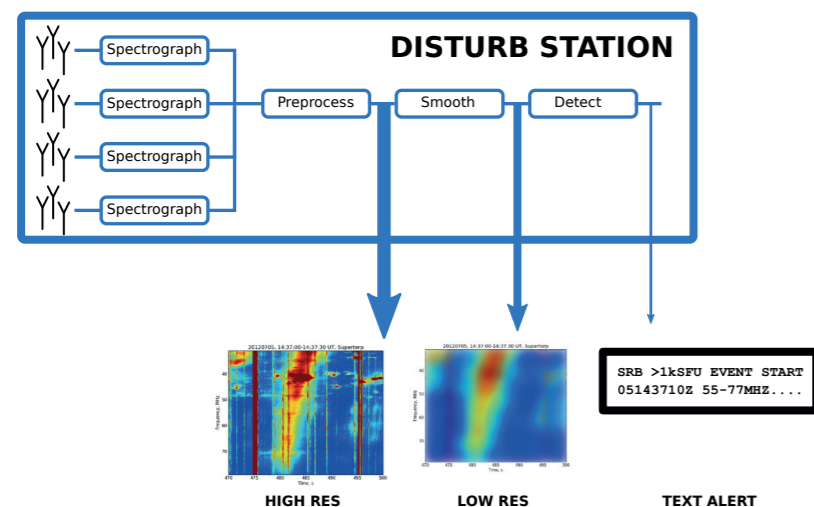
Bij SRB's werkt dat anders. Die worden pas gedetecteerd als ze er zijn en daar is momenteel geen enkele voorwaarschuwing mogelijk. Maar hun effecten kunnen enorm zijn. Radioverbindingen worden overschreeuwd en radarinstallaties verblind. Zo kon de radar in Zweden op 4 november 2015 tijdelijk geen vlieg-

tuigen identificeren toen hij verblind werd door een SRB. De feitelijke uitbarsting heeft niet lang geduurd, maar het vliegverkeer was pas weer normaal na een ruim een uur, nadat men zich ervan verzekerd had dat de radar zelf niet kapot was. Daarna duurde het nog lang voordat een SRB definitief als de schuldige kon worden aangewezen.

Ook militairen zijn afhankelijk van zowel betrouwbare radiocommunicatie in afgelegen gebieden als een correcte werking van radarsystemen met een grote verscheidenheid aan functies. Indien daar iets niet werkt moet zo snel mogelijk worden vastgesteld waardoor dat komt: apparaat stuk? Verstoring door de tegenpartij? De zon? Hoe eerder dat bekend is, hoe minder verwarring. Het live mee kunnen kijken naar wat de zon doet is dus van groot belang.

Voor het zo snel mogelijk opmerken van SRB's zijn maar weinig bronnen beschikbaar. Het *Radio Solar Telescope Network* (RSTN) van de Amerikaanse luchtmacht doet dit weliswaar al vanaf de jaren zestig, maar deelt haar livegegevens niet zomaar. De gegevens die wel gedeeld worden zijn slechts van een paar frequenties beschikbaar en tientallen minuten oud.

Een andere bron van zonnegegevens is het *e-Callisto*-netwerk. Dat deelt met een tijdsvertraging van 15 tot 30 minuten gegevens van het radio-zonnenspectrum, opgenomen met allerlei soorten antennes. Het netwerk gebruikt gestandaardiseerde ontvangers die achtereenvolgens 400 kanalen kunnen bemonsteren. De gegevenskwaliteit van dat netwerk is echter niet consistent en de gevoeligheid is vaak laag, onder andere door het feit dat de ontvangers niet alle kanalen tegelijk meten, maar de een na de ander. De gebruikte Callisto-ontvanger is wel relatief



Figuur 4. Diagram van een DISTURB-antennestation. Links ontvangen verscheidene soorten antennes de radiogolven en worden daar vervolgens nauwkeurige spectra van gemaakt. Die worden voorberekt en samengevoegd (*preprocess*), gemiddeld tot een gevoeliger en kleiner formaat (*smooth*), waarna een detectie-algoritme (*detect*) vaststelt of er een SRB gaande is. Als dat zo is wordt er een tekstbericht verstuurd naar partijen die daarin geïnteresseerd zijn.



Figuur 5. De antenntypen van DISTURB per frequentieband.

goedkoop. Daardoor kan een e-Callisto-station vaak al voor een paar duizend euro gerealiseerd worden, afhankelijk van hoeveel werk bijvoorbeeld een volksterrenwacht of universiteit zelf wil en kan stoppen in de constructie ervan.

Daarnaast bestaan er professionele radio-observatoria zoals de LOFAR-telescoop (Low Frequency Array, waarvan enkele stations in noordoost Nederland staan), die uitstekende datakwaliteit leveren, maar de zon niet permanent in de gaten houden omdat ze voornamelijk voor andere waarnemingen gebruikt worden. Figuur 3 vergelijkt e-Callisto-gegevens van een radio-uitbarsting uit 2014 met LOFAR-gegevens van hetzelfde moment, die een veel betere gevoeligheid en kwaliteit hebben.

DISTURB

Het DISTURB-project (*Disturbance detection by Intelligent Solar radio Telescope of (Un)perturbed Radiofrequency Bands*) heeft als doel om uiteindelijk 24 uur per dag het hele zonnenspectrum van 3 MHz (100 m golflengte) tot 3000 MHz (10 cm) in meer dan 600.000 kanalen tegelijk in de gaten te houden. Dat alles met een gevoeligheid die tientallen keren hoger is dan de meeste e-Callisto-stations. Daarbij verwacht DISTURB de eerste waarschuwingen al binnen twee minuten aan het KNMI en het Ministerie van Defensie door te kunnen geven, zodat zij belanghebbenden zo snel mogelijk kunnen waarschuwen.

Op 25 september sloot het ontwerpconsortium, bestaande uit het Delftse high-tech bedrijf S&T, het Nederlands instituut voor radioastronomie ASTRON en het KNMI de eerste ontwerpfasen af. Dat ontwerp is mogelijk gemaakt door een subsidie voor nationale technologieprojecten, die door het

Ministerie van Defensie werd verleend. In een DISTURB-antennestation (Figuur 4) zetten vijf soorten antennes (Figuur 5) de radiogolven van de zon om in elektriciteit. In een gegevensverwerkingseenheid (voor het gemak ingebouwd in een zeecontainer) worden die voltages gemeten en omgezet in een radiospectrum van de zon met meer dan 600.000 kanalen. Duizend keer per seconde wordt zo'n spectrum doorgegeven aan de voorberekingsstap (*preprocess* in Figuur 4). Die markeert door menselijke activiteit veroorzaakte radio-storingen en ijkt de gegevens. Vervolgens plakt die de deelspectra van de vijf antennesoorten aan elkaar tot één groot, continu spectrum.

De 600.000 kanalen zijn vooral nodig voor het wegknippen van storingen zoals luchtvaartradioverkeer, portofoons, en radarsystemen. Die zijn vaak smalbandig (zie de dunne horizontale lijnen bovenaan in de LOFAR-meting in Figuur 3). Radiostraling van de zon heeft vaak een veel grotere bandbreedte: tientallen procenten van de waarnemfrequentie is geen uitzondering (Figuur 3). Om de gevoeligheid te vergroten en de hoeveelheid gegevens te verkleinen worden de gegevens vervolgens gemiddeld in de *smooth*-stap. Eerst naar kanalen van ongeveer een duizendste van de frequentie (bijvoorbeeld 100 kHz op een meefrequentie van 100 MHz) en tijdstappen van ongeveer een honderdste seconde, en vervolgens na verdere filtering naar ongeveer een honderdste van de frequentie en 0,1-1 seconde.

Op die laatste gegevensstroom gaat een *real-time* detectiealgoritme draaien. Dat onderscheidt de SRB van andere vormen van breedbandige storing en classificeert ze zelfs in de verschillende soorten uitbarstingen. Dat gebeurt

door middel van een *machine learning*-systeem op basis van convolutionele neurale netwerken. Dergelijke systemen worden ook gebruikt voor bijvoorbeeld gezichtsherkenning en het 'lezen' van verkeersborden in zelfrijdende auto's. De lage resolutie-spectra en de bijbehorende voorlopige detecties gaan vervolgens naar een centraal punt: de *hub*. Die verzamelt de gegevens van alle stations wereldwijd en maakt een betrouwbaarder spectrum door gegevens van de verschillende stations te combineren.

Prototype

Uiteindelijk moet DISTURB een wereldwijd systeem worden om de zon 24 uur per dag te kunnen volgen. Daarvoor zijn ongeveer tien antennestationen verspreid over alle geografische lengtegraden nodig. Zover is het echter nog niet. Na voltooiing van de ontwerpfase is nu de eerstvolgende stap het bouwen van een zo compleet mogelijk prototype. Daarmee kunnen we controleren of alle aannames en ideeën die in het laboratorium geweldig leken, dat buiten in de natuur nog steeds zijn. Onze ervaring met bijvoorbeeld de LOFAR-telescoop is dat er altijd wel dingen zijn die je van tevoren niet hebt bedacht.

We zijn nu hard op zoek naar geld voor dat prototype. Daarmee hopen we voor het volgende zonnemaximum in 2025 alle benodigde kennis te hebben verzameld om een operationele service te realiseren. Dan weten de Nederlandse krijgsmacht en vitale sectoren tijdig waarom radioverbindingen niet werken en kunnen wetenschappers verder puzzelen aan het begrijpen van zonnenvlammen. Misschien kunnen we die dan ooit nog eens wél voorspellen! ●