Jansens Revue E 17/02/14 15:20 Page 1

De verschillende vormen van zonneactiviteit en hun invloed op de mens en zijn technologie

Jan Janssens, Petra Vanlommel, Solar-Terrestrial Centre of Excellence, Ringlaan 3, 1180 Brussel, België

SAMENVATTING

De Zon, Helios, Sol, ... er bestaan vele namen voor die gele bol die dagelijks ons hemelgewelf doorkruist en onze warmte- en lichtbron bij uitstek is. Dankzij satellietwaarnemingen hebben we onze ster leren kennen als een dynamisch en explosief hemelobject dat aan de basis ligt van het zogenaamde ruimteweer dat een belangrijke impact heeft op onze technologie.

RÉSUMÉ

Le Soleil, Helios, Sol,... nombreux sont les noms qui ont été donnés à cette boule brillante qui traverse journellement les cieux et nous fournit la lumière et la chaleur indispensables. Des images satellites ont révélé notre astre comme un objet dynamique et explosif qui est à la base de la dite météorologie spatiale, ayant un impact incontournable sur notre technologie.

ABSTRACT

The Sun, Helios, Sol ... there are several names for that yellow ball that daily transits the heavenly firmament and that provides us the necessary light and warmth. Satellite observations show our star as a dynamic and explosive object that is at the base of the so-called space weather which has a considerable impact on our technology.

De zon in haar gewone energetische doen: het ruimteklimaat

Zonnestraling en zonnewind

De zon is niet vast, maar een bol van kolkend plasma, d.i. een toestand waarin alle materie bestaat uit elektrisch geladen deeltjes die een hoge thermische energie hebben en zich gedragen in functie van de aanwezige magnetische structuren. De zon zelf is een zeer dichte plasmabol waarvan we het oppervlak de fotosfeer ("sfeer van licht") noemen. Hierrond hebben we de ijle zonneatmosfeer die is opgedeeld in lagen: de chromosfeer, de transitiezone en de corona. De zon roteert in ongeveer 27 dagen rond haar eigen as, de bovenliggende zonneatmosfeer en coronale magnetische structuren roteren gezellig mee.

We kennen de zon in de eerste plaats als een bron van stralingsenergie in de vorm van warmte, licht en het UV waardoor onze huid verbrandt bij langdurige blootstelling. De zonnestraling beperkt zich niet tot deze 3 soorten, maar straalt in het ganse elektromagnetische spectrum: van radiogolven tot de meest energetische gammastraling. Deze elektromagnetische golven planten zich voort met de snelheid van het licht. De stralingsenergie die de aarde bereikt, bedraagt ongeveer 1365 W/m² aan de top van de atmosfeer. Dit is de "total solar irradiance" (TSI) en wordt gebruikt in klimaatstudies. De fotosfeer is een relatief dunne schil die voornamelijk straalt in zichtbaar licht. De corona daarentegen straalt vooral in het extreem ultraviolet (EUV), en is merkwaardig genoeg veel heter dan de fotosfeer. De reden hiervoor is vooralsnog onbekend. Als we een foto nemen van de zon in het EUV, zien we dat het plasma aan de magnetische veldlijnen "kleeft" en deze zo zichtbaar maakt. De corona blijkt een warboel van structuren en lussen te zijn (Fig. 1).

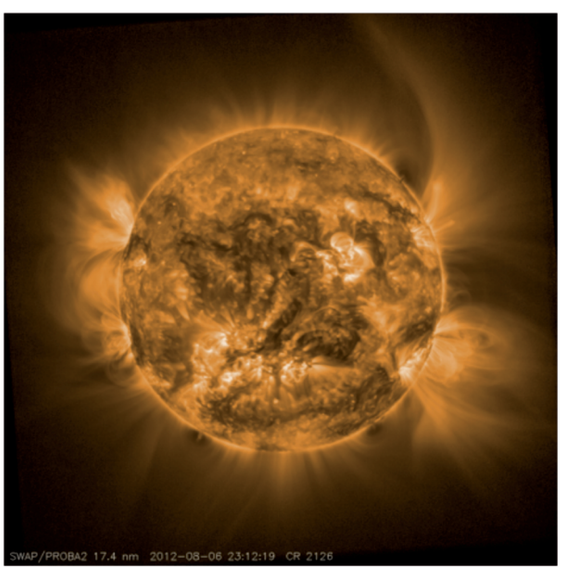

Fig. 1: Opname van de corona, de hete buitenatmosfeer van de zon, gemaakt met de SWAP telescoop aan boord van de ESA satelliet PROBA2. (Credits: PROBA2 Science Centre)

Jansens Revue E 17/02/14 15:20 Page 2

E Tijdschrift

Zonnestormen en hun impact op elektrische netten

De zon verliest niet alleen energie in de vorm van straling, maar ook in de vorm van een permanente, radiale stroom van zonnemassa. Dit is de zonnewind. Deze deeltjesstroom heeft een snelheid van ongeveer 400 km/s. Die creëert als het ware een bel in de interstellaire ruimte, die de heliosfeer wordt genoemd en zich uitstrekt tot meer dan honderd keer de afstand aarde-zon. Daarnaast hebben we nog een vorm van energie die je niet beschrijft zoals de relatief traag bewegende massa of als een lichtgolf die zich met de lichtsnelheid voortplant, maar als elektrisch geladen deeltjes die in een schroefbeweging langs magnetische veldlijnen cirkelen. Dit zijn de zogenaamde Solar Energetic Particles (SEP). De globale karakteristieken van deze 3 energievormen beschrijven het ruimteklimaat. Dit is de gemiddelde toestand van de ruimte in de heliosfeer bepaald door de zonnewind, de zonnestraling en de energetische zonnedeeltjes. De toestand op een bepaald moment is het ruimteweer.

Variaties in de zonnewind – sector boundary crossing en coronale gaten

Magnetische velden worden, door een proces dat de zonnedynamo wordt genoemd, zo'n 200.000 km onder het zonneoppervlak opgewekt. De zon is in feite een gigantische magnetische dipool, een staaf met een positieve en negatieve magnetische kant, waarbij magnetische lijnen van de magnetische noordpool naar de magnetische zuidpool worden geleid. Deze veldlijnen worden echter ter hoogte van de evenaar door de zonnewind meegesleurd: het dipoolveld wordt extreem uitgerokken, waardoor een gebied ontstaat met veldlijnen die van de zon weg wijzen en een gebied met veldlijnen die naar de zon wijzen. Het heliosferisch stroomvlak is de grens hiertussen en is in feite de extensie van de magnetische zonne-evenaar.

De zonnewind blaast vanuit het ganse zonneoppervlak geladen deeltjes de ruimte in. De deeltjes van de zonnewind bewegen zich radiaal van de zon weg, maar zijn wel steeds gebonden aan de magnetische veldlijnen die door de rotatie van de zon opgedraaid worden in een spiraal. Het was E. Parker die in de jaren 50 met het theoretische concept van de zonnewind en de spiraal op de proppen kwam. Deze theorie werd nadien bevestigd door satellietwaarnemingen. Parker wordt dan ook terecht de peetvader van de zonnewind genoemd en is meer dan het vermelden waard. Wanneer de dipool-as niet parallel staat met de rotatie-as van de zon, heeft het heliosferisch stroomvlak de vorm van een elegante ballerinajurk met 2 mooie golven (Fig. 2). Een golf in deze jurk markeert dus eigenlijk de overgang tussen 2 sectoren in het heliosferisch stroomvlak en wordt een sector boundary genoemd.

Wanneer de jurk ronddraait, bevindt de aarde zich nu eens in een sector of ruimte waar de veldlijnen naar de zon gericht zijn, waarna de aarde vervolgens het heliosferisch stroomvlak kruist om terecht te komen in een sector waar de veldlijnen van de zon weg gericht zijn. Dit is een sector boundary crossing (SBC) die het magnetisch veld van de aarde kan verstoren, maar slechts zelden aanleiding geeft tot een magnetische storm.

De uitwaaierende, open magnetische veldlijnen aan de polen vormen de zogenaamde polaire coronale gaten of coronal holes (CH). Je hebt er 1 aan de noordpool en 1 aan de zuidpool. Op EUV-foto's van de corona zien we een donker gat: op die plaats is minder plasma op die bepaalde temperatuur aanwezig. Het plasma ontsnapt daar via open magnetische veldlijnen en ligt aan de basis van de snelle zonnewind, die een snelheid van 700-800 km/s kan halen. Een polair coronaal gat kan uitbreiden naar lagere breedtegraden, met soms zelfs extensies tot voorbij de zonne-evenaar. Het is nu net de zonnewind die vertrekt op lagere breedtegraden of in de buurt van de ecliptica, die een impact kan hebben op het magnetische schild van de aarde. De ruimte rond de aarde is dus zeker geen perfect vacuüm, maar is gevuld met een heet en zeer ijl plasma. Niet alle coronale gaten hoeven per se gelinkt te zijn met de zonnepolen. Ze kunnen ontstaan overal op het zonneoppervlak waar deeltjes via open magnetische veldlijnen ongehinderd kunnen ontsnappen (Fig. 3).

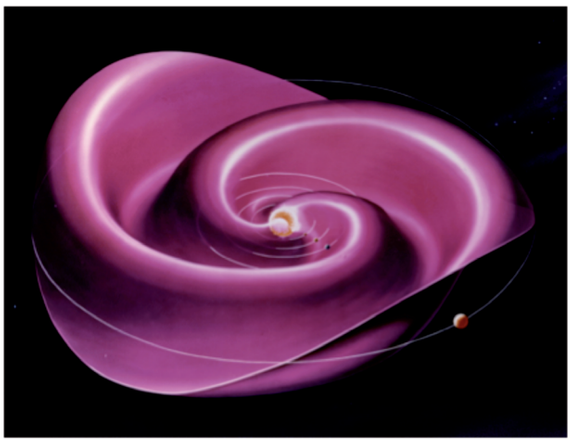

Fig. 2: Het heliosferisch stroomvlak scheidt gebieden waar magnetische veldlijnen naar de zon toewijzen van deze die van de zon wegwijzen. (Credits: NASA)

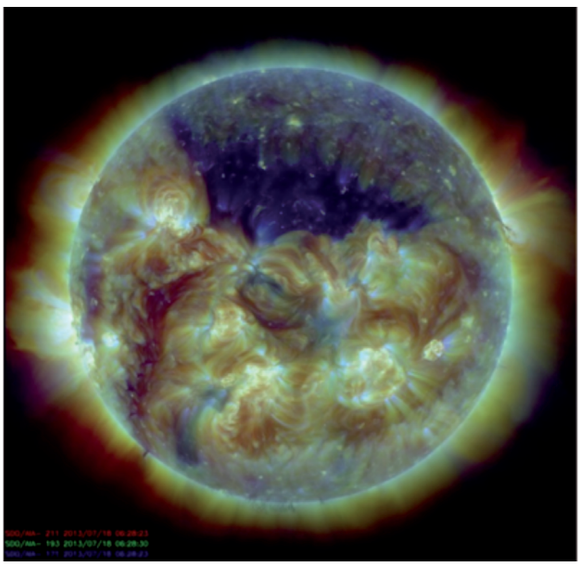

Fig. 3: Een zeer groot coronaal gat (bijna 300 keer de oppervlakte van de aarde) was zichtbaar op de zon in juli 2013 en zorgde voor enige onrust in het magnetisch veld van de aarde. (Credits: SDO/AIA)

Jansens Revue E 17/02/14 15:20 Page 3

Coronale gaten zijn al bij al stabiele structuren in de zonneatmosfeer die meerdere zonnerotaties kunnen blijven bestaan en de aarde dus met een periode van ongeveer 27 dagen kunnen beïnvloeden. Door de bijzondere eigenschappen van coronale gaten kunnen de snelle plasmadeeltjes interageren met de trager bewegende "gewone" zonnewind voor zich. Die tragere zonnewind wordt dan wat samengedrukt, waarbij het overgangsgebied soms ook een schokgolf vertoont. Het geheel wordt een co-rotating interaction region (CIR) genoemd, en kan zich via de Parker spiralen meermaals rond de zon winden. Zo een interactiegebied met verhoogde dichtheid en magnetische veldsterkte, kan de magnetosfeer (dit is het magnetisch schild van de aarde) verstoren en dit op een vrij regelmatige basis aangezien coronale gaten en de bijbehorende CIR stabiele structuren zijn. Coronale gaten, CIRs, en sector boundary crossings zijn niet-eruptieve variaties in de zonnewind.

De actieve zon die het ruimteweer maakt

Zonnevlekken – de bakermat van zonnevlammen

De donkere vlekken die zo dikwijls op het zonneoppervlak te zien zijn, worden zonnevlekken genoemd. Ze omvatten een zeer sterk magnetisch veld dat verhindert dat het hete plasma uit het inwendige van de zon naar het oppervlak stijgt waardoor de temperatuur lokaal lager is. De zonnevlekken hebben nog steeds een temperatuur van zo'n 4.500 graden, maar het temperatuurverschil met de vlekkeloze omgeving (ongeveer 6.000 graden) zorgt ervoor dat de zonnevlekken er donker uitzien.

Het magnetisch veld is gebundeld in magnetische fluxbuizen die opstijgen vanuit het inwendige van de zon en door het zonneoppervlak breken, een beetje vergelijkbaar met een binnenband van een fiets die door het wateroppervlak steekt. Zonnevlekken komen dus meestal in groepen voor die bipolair zijn, d.w.z. aan één kant komt het magnetisch veld uit het zonne-inwendige, en aan de andere kant keert het magnetisch veld terug in het zonne-inwendige. In magnetogrammen, die de richting van dit magnetisch veld weergeven, zijn die meestal als resp. witte en zwarte gebieden te zien (Fig. 4).

Heinrich Schwabe ontdekte in 1843 dat het aantal zonnevlekken niet zomaar willekeurig verandert, maar varieert over een periode van ongeveer 11 jaar. Dit wordt de zonnevlekkencyclus genoemd. Tijdens een minimum zijn gedurende lange perioden zo goed als geen zonnevlekken te zien, tijdens een maximum zijn net meer zonnevlekken aanwezig. In 1848 stelde Rudolf Wolf het zonnevlekkengetal *R* voor. Dit getal houdt rekening met het aantal groepen en individuele zonnevlekken en is o.a. een maat voor hoe erg de zonneschijf bevlekt is. R is een veelgebruikte index voor de zonneactiviteit en eruptieve fenomenen zoals zonnevlammen. Het mooie aan het zonnevlekkengetal is dat we deze kunnen bepalen door eenvoudige waarnemingen vanop de aarde zonder al te speciale apparatuur. Systematische waarnemingen van het zonnevlekkengetal zijn beschikbaar vanaf het begin van de 18de eeuw (Fig. 5).

Zonnevlekken liggen aan de oorsprong van zonnevlammen. Die laatste ontstaan door een proces dat magnetische reconnectie wordt genoemd. Dit is een astrofysische term die in het elektrisch jargon het best

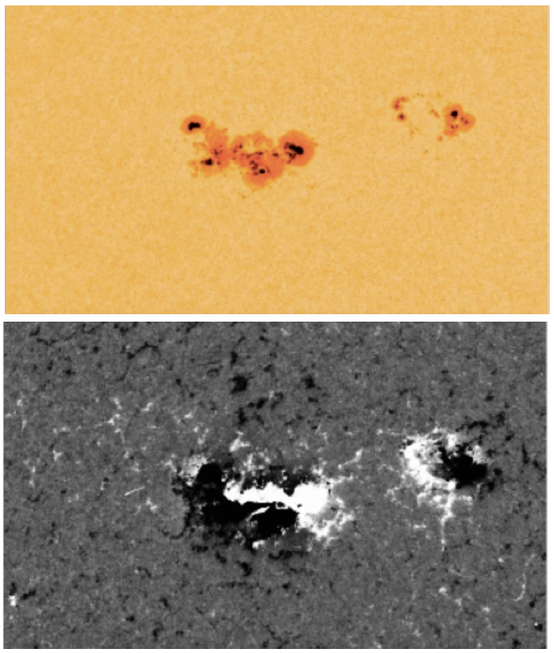

Fig. 4: Het Solar Dynamics Observatory (SDO) maakte deze opname van een complexe zonnevlekkengroep in maart 2012. Het magnetogram onderaan laat zien dat de tegengestelde magnetische velden heel dicht bij elkaar liggen. (Credits: SDO/AIA)

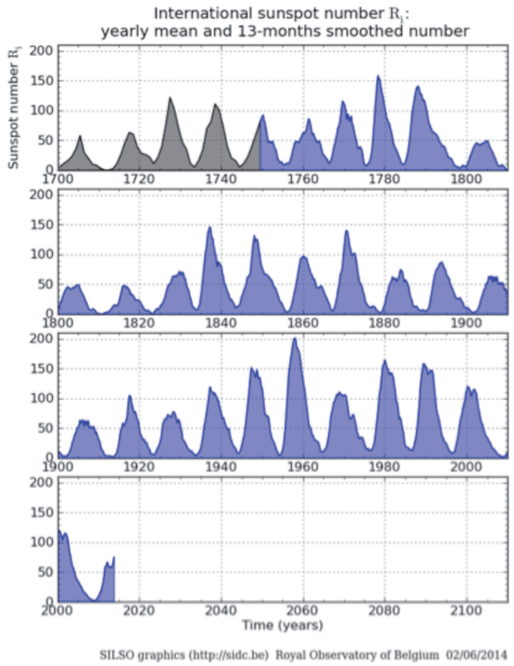

Fig. 5: Evolutie van het zonnevlekkengetal sinds het begin van de 18de eeuw. De op- en neergaande beweging van *R* wordt een zonnecyclus genoemd. De huidige zonnecyclus heeft het nummer 24 en is één van de zwakste in bijna 100 jaar. (Credits: SILSO)

Jansens Revue E 17/02/14 15:20 Page 4

Zonnestormen en hun impact op elektrische netten

overeenkomt met “kortsluiting”. Gewoonlijk staan de (hoofd)vlekken met tegengestelde magnetische polariteit in een zonnevlekkengroep voldoende ver uit elkaar en doen zich geen zonne-uitbarstingen voor. Bij complexe zonnevlekkengroepen, of bij een kop-staartbotsing tussen twee verschillende zonnevlekkengroepen, kunnen vlekken met tegengestelde polariteit te dicht bij elkaar komen en gaan de magnetische velden zich herstructureren (Fig. 4). Bij reconnectie wordt magnetische energie omgezet in stralingsenergie (een “lichtflits”, vooral in EUV en röntgen) en worden er meestal ook geladen deeltjes de ruimte ingeslingerd. De totale energie die bij de krachtiger zonnevlammen vrijkomt, is het equivalent van enkele miljarden Hiroshima atoombommen. Gelukkig beschermt de aardatmosfeer ons tegen de directe invloed van zonnevlammen. Maar de ionosfeer aan de dagkant van de aarde kan danig verstoord worden zodat de performantie van bv. navigatiesystemen gevoelig kan verminderen.

Een zonnevlam wordt vooral gezien in een plotse verhoging van de EUV- en röntgenstraling van de zon, maar bij krachtige uitbarstingen zien we ook plotse toenames in intensiteit op radiogolflengten, in wit licht, en zelfs in het gammagebied. Een zonnevlam laat zich dan ook voelen doorheen het gehele elektromagnetische zonnespectrum.

Omdat de aardatmosfeer de meeste EUV- en röntgenstraling tegenhoudt, kunnen we zonne-uitbarstingen in deze delen van het spectrum enkel via satellieten waarnemen. De GOES-satellieten van NOAA meten de zonnestraling in het röntgen sinds 1976. SDO (Solar Dynamics Observatory) en PROBA2/SWAP en LYRA doen waarnemingen in het EUV (Fig. 6).

Op basis van hun maximale röntgenflux worden zonnevlammen onderverdeeld in 5 klassen, elk 10 maal sterker dan de voorgaande. De meest gebruikte zijn de C (“common”, gewoon), M (medium) en X (eXtreme) klassen. Sinds de start van de systematische waarnemingen in 1976, werden er al zo’n 50.000 C-, 5.000 M- en 500 X-klasse zonnevlammen geregistreerd.

Trage massieve plasmawolken, snelle energetische deeltjes

Naast zonnevlammen hebben we nog 2 andere eruptieve ruimteweersfenomenen: Solar Energetic Particles (SEP) event en een Coronale Massa Ejectie (CME). Het eerste betreft een eerder zeldzaam verschijnsel, waarbij hoogenergetische deeltjes versneld worden tot relativistische snelheden waardoor ze de aarde reeds binnen de 15 tot 120 minuten kunnen bereiken (Fig. 7). Hiervoor moet de aarde wel magnetisch verbonden zijn met de bron van de uitstoot. Deze deeltjes vliegen niet radiaal, maar volgen magnetische veldlijnen. Het is zelfs mogelijk dat deeltjes uit een brongebied dat zich reeds aan de achterzijde van de zon bevindt, toch de aarde kunnen bereiken. Dit doet zich voor als de zonnewind niet erg snel is en het interplanetair magnetisch veld meer gebogen is.

Het andere type betreft grote hoeveelheden zonneplasma die de ruimte worden in gekatapulteerd. Een CME ontstaat wanneer de magnetische lussen zo sterk worden uitgerokken en gedraaid dat ze eventueel knappen en het eraan verbonden plasma weggeslingerd wordt,

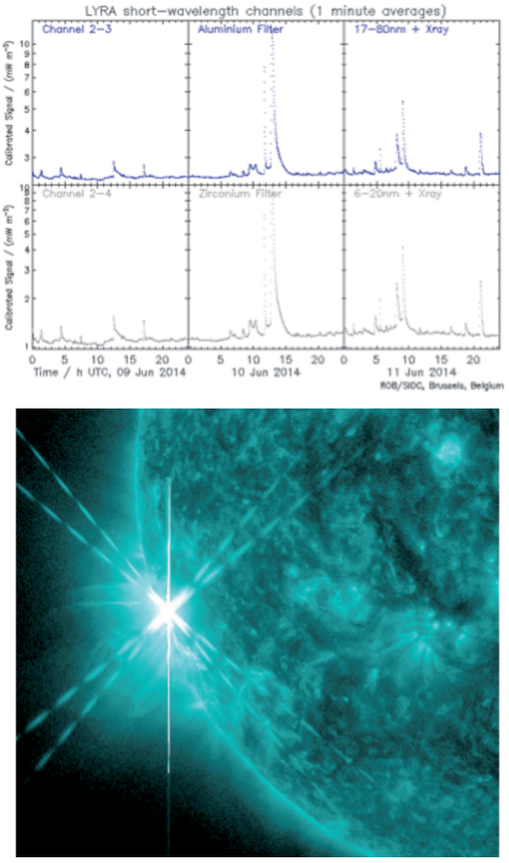

Fig. 6: De radiometer LYRA aan boord van PROBA2 nam op 10 en 11 juni 2014 een verhoogde EUV-straling waar. Deze pieken kwamen overeen met de zonnevlammen gemeten door GOES in het röntgen. In het EUV beeld gemaakt door SDO zien we de zonnevlam als een lokale lichtflits. (Credits: PROBA2/LYRA en SDO/AIA)

radiaal wegvliegend van de zon. De opgeslagen magnetische energie wordt omgezet in kinetische energie. De plasmawolk beweegt met een veel lagere snelheid door de interplanetaire ruimte en overbrugt de afstand zon-aarde (1 astronomische eenheid, 1 AE) in gemiddeld 2 tot 3 dagen. CMEs zijn dus door de zon uitgebraakte, reusachtige plasmawolken met een gemiddelde massa van een miljard ton. De meer solide CMEs kunnen gemakkelijk 10 tot 100 keer zwaarder zijn, vergelijkbaar met de massa van de Mount Everest! In tegenstelling tot de protonen kunnen we deze deeltjeswolken wel zien als ze de zon verlaten. Daar is wel een coronagraaf voor nodig, d.i. een toestel dat de zonneschijf afdekt en zo het directe zonlicht uitschakelt (Fig. 8). De gemiddelde snelheid van een CME bedraagt ongeveer 500 km/s, maar die kan ook lager liggen (beneden de 200 km/s) of veel hoger (meer dan 3.000 km/s). Wanneer een CME recht op de aarde afkomt, kunnen we dat afleiden uit de beelden omdat de CME dan een uitdijende ring rond de zon vormt. Dit wordt een halo CME genoemd.

Impact

Het ruimteweer betreft alle omstandigheden op de zon, in de zonnewind, en in de magnetosfeer, ionosfeer en

Jansens Revue E 17/02/14 15:20 Page 5

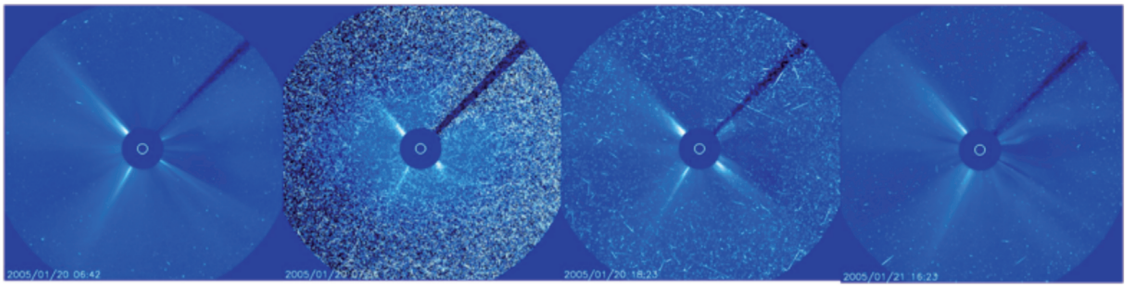

Fig. 7: Op 20 januari 2005 woedde er een hevige protonstorm waarbij enorm veel Solar Energetic Particles insloegen op de coronagraaf aan boord van SOHO waardoor het beeld een tijdlang troebel werd. De deeltjesflux steeg zeer plots en zeer sterk: in het beeld van 06:42UT zien we geen inslagen terwijl het beeld van 07:45UT helemaal "besneeuwd" is. (Credits: SOHO)

thermosfeer van de aarde die de prestaties en de betrouwbaarheid van technologische systemen in de ruimte en op grond kunnen beïnvloeden en die een gevaar kunnen betekenen voor het menselijk leven of de gezondheid. De straling en deeltjes die bij een zonneuitbarsting vrijkomen, hebben zeker de mogelijkheid om dit soort schade toe te brengen. Hoewel het magneetveld en de atmosfeer van de aarde ons tegen al te grote technologische averij behoeden, is deze dubbele afweergordel niet "waterdicht" bij grote zonnestormen en neemt hun beschermende werking snel af naarmate we ons verder van het aardoppervlak verwijderen (Fig. 9).

De extra röntgenstraling van een zonnevlam veroorzaakt verhoogde ionisatie in de atmosfeer van de aarde. De onderste laag van de ionosfeer absorbeert hierdoor hoogfrequente (HF) radiosignalen afkomstig van grondstations, en de overige lagen leiden tot storingen in het communicatieverkeer met satellieten op de andere frequenties, evenals grotere onnauwkeurigheden in GPS-posities.

Astronauten hebben niet zoveel te vrezen van de röntgenstraling, voor zover ze in een ruimtetuig zitten dat hen bijkomende bescherming biedt. Daarentegen hebben ze wel een probleem wanneer ze terecht komen in een storm van snelle, hoogenergetische deeltjes (de protonstormen). Deze deeltjes kunnen zonder veel problemen door de centimetersdikke wanden van ruimtetuigen en -stations heen dringen en de astronauten bestralen. Ruimtevaartorganisaties trachten de astronauten beter te beschermen door hen in de inwendige ruimten van het ruimtestation onder te brengen, en op het einde van hun ruimtereis wordt hun stralingsdosismeter nauwgezet gecontroleerd.

De protonen vormen ook een (weliswaar kleiner) stralingsprobleem voor de bemanning en de passagiers van transpolaire vluchten. De geladen deeltjes, die langs de openingen van het geomagnetische veld aan de aardpolen de atmosfeer van de aarde binnendringen, verstoren de ionosfeer en dus de radiocommunicatie. In geval van een zwakke protonstorm verlaagt het vliegtuig zijn hoogte, maar bij een sterke protonstorm worden de vluchten omgeleid via een zuidelijker gelegen route. Dit betekent tijdverlies voor de passagiers en bijkomende kosten voor de luchtvaartmaatschappijen.

De effecten van sterke protonstormen (energieën van 100 MeV of meer) zijn ook op grond waarneembaar. Niet

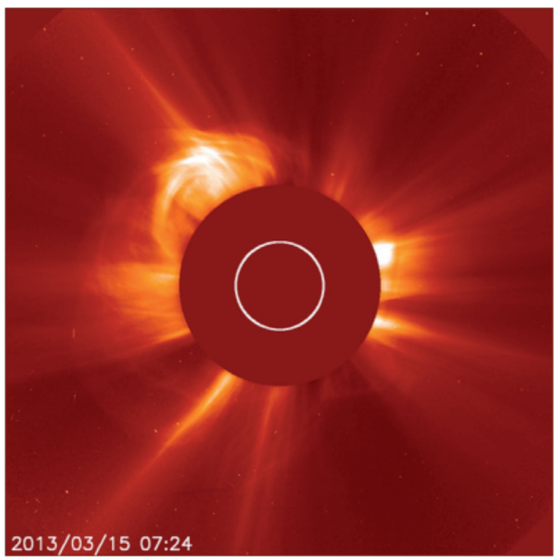

Fig. 8: Dit is een coronagrafisch beeld genomen door SOHO/LASCO op 15 maart 2013 van de CME die een ionosferische storm veroorzaakte op 17 maart. (Credits: SOHO)

rechtstreeks, maar door de restanten van botsingen van de protonen met deeltjes hoog in de aardatmosfeer. Deze douche van tweederangsdeeltjes bereikt het aardoppervlak in de vorm van neutronen, en wordt gemeten door een wereldwijd netwerk van neutronenmonitors. Sinds het begin van de metingen in 1942 zijn er nog maar 71 van deze "Ground Level Events" (GLEs) geregistreerd.

De satellieten krijgen het echter hard te verduren tijdens deze protonbombardementen. De deeltjes kunnen elektronische componenten binnendringen waardoor deze defect geraken, of fouten en ongewenste bevelen ("spookbevelen") creëren. Satellieten die sterren gebruiken om zich te oriënteren ("star tracker"), kunnen door de continue stroom van lichtflitsjes op de detectoren volledig verward geraken, waardoor ze zich van de zon afwenden en de zonnepanelen niet meer de nodige energie kunnen leveren. De zonnepanelen zelf krijgen het ook zwaar te verduren, omdat door de botsingen met al die protonen, hun capaciteit om elektriciteit te produceren veel sneller kan verminderen dan voorzien. Bij de zwaarste stormen kan deze "veroudering" verscheidene percenten bedragen.

Jansens Revue E 17/02/14 15:20 Page 6

Zonnestormen en hun impact op elektrische netten

De impact van een CME op het magnetisch veld van de aarde vertaalt zich gewoonlijk in een geomagnetische storing. Een onschadelijk effect van dergelijke storing is het poollicht. Het ontstaat door de botsing van de energierijke deeltjes in de CME met deeltjes uit de atmosfeer. De kleuren hangen af van met welke atmosferische deeltjes gebotst wordt. Atomair zuurstof geeft de typische groene kleur, moleculair stikstof geeft blauwpaarse tinten. Normaal is poollicht enkel zichtbaar op hoge breedten rond de geomagnetische polen (Scandinavië, Canada, Alaska, Siberië), maar bij hevige geomagnetische stormen breidt de poollichtgordel zich uit naar lagere breedten. Een handjevol keren per zonnecyclus is poollicht ook goed vanuit België waarneembaar.

Bij impact op het geomagnetische veld wordt een grote hoeveelheid geladen deeltjes (vooral elektronen) gedumpt in de atmosfeer. Dit zorgt opnieuw voor storingen in radiocommunicatie en elektrische ontladingen in de elektronische componenten, evenals voor een expansie van de atmosfeer. Satellieten ondervinden hierdoor meer wrijving met de bovenste laag van de atmosfeer, waardoor ze gaan vertragen, sneller hoogte verliezen, en uiteindelijk kunnen opbranden in de atmosfeer, tenzij ze tijdig een boost krijgen om ze terug op een veilige hoogte te brengen. De vliegwielen die gebruikt worden om satellieten in een gewenste positie te houden, kunnen ook van slag geraken door de plotse dichtheidstoename in the atmosfeer. Manuele controle vanuit grondstations is dan vereist om de satelliet in zijn baan te houden. Dat soort interventies is trouwens ook vereist voor geostationaire satellieten zoals GOES, die op een hoogte van zo'n 36.000 km boven de evenaar "hangen". Als de CME een hoge snelheid en dichtheid heeft, kan ze door de verhoogde magnetische druk (intens magnetisch veld) en plasmadruk (een snelle massa met een grote dichtheid) het beschermende geomagnetische schild immers zover naar de aarde toe drukken, dat deze satellieten plots worden blootgesteld aan de zonnewind (Fig. 10).

Tijdens een geomagnetische storm kunnen de snel fluctuerende magnetische velden ook elektrische stromen induceren in de aardkorst, de zogenaamde GIC (geomagnetically induced currents). Deze vinden hun weg in lange, rechte geleiders op het aardoppervlak, zoals oliepijpleidingen, elektriciteitsnetwerken, spoorwegleidingen en onderzeese communicatiekabels. De extra elektrische stroom kan bijvoorbeeld resulteren in de vernietiging van één of meerdere transformatoren, waardoor het lokale elektriciteitsnetwerk kan uitvallen.

Perfecte stormen

De hierboven aangehaalde invloeden zijn geen doemscenario's, maar een heuse realiteit. Eén van de bekendste, zeg maar beruchtste zonnestormen was die van maart 1989. Toen verscheen één van de grootste en meest complexe zonnevlekkengroepen van de afgelopen eeuw, NOAA 5395. Tijdens zijn transit produceerde dit gebied niet minder dan 11 X-klasse zonnevlammen (van het eXtreme type dus), en deze waren dikwijls vergezeld van hoogenergetische deeltjes. De protonflux was boven de alarmdrempel van 8 tot 13 maart en de astronauten van de Space Shuttle Discovery werden zoveel mogelijk in de meest beschermende ruimten ondergebracht. Het grootste effect kwam evenwel van de uitgestoten plasmawolken die de aarde bereikten op 13 maart en er één van de grootste geomagnetische stormen veroorzaakte sinds het begin der systematische waarnemingen in de 19de eeuw. Dat mocht wel blijken uit de zichtbaarheid van het poollicht, dat niet alleen in België, maar zelfs tot in Texas en Florida zichtbaar was. De CME dumpte een massa deeltjes in de atmosfeer van de aarde die hierdoor gevoelig opzwelde. Door de wrijving verloren heel wat satellieten hoogte en weken van hun baan af.

Energie	v	t_{AE}	Bescherming Aarde	Ruimteweers fenomeen	Plaats van impact op Aarde
E.M. Straling	c	8 min	Atmosfeer	Zonnevlam Eruptief	Dagzijde
Zonnewind E_{kin} - massa	300-700 km/s	5 – 3 dagen	Magnetosfeer	CME - Eruptief CH – Niet-eruptief SBC – Niet-eruptief	Breedtegraad
Deeltjes $p^+, e^-, \ldots$	~c	15-120 min	Magnetosfeer	Protonenstorm Eruptief	Aardpolen

Met t_{AE} de tijd nodig om de afstand 1 AE te overbruggen, de lichtsnelheid c en de kinetische energie E_{kin}

Fig. 9: Overzicht van de diverse ruimteweersfenomenen en enkele typische parameters.



Fig. 10: Ruimtestations en satellieten kunnen het zwaar te verduren krijgen door de talrijke effecten van zonnestormen. (Credits: PROBA2)



Fig. 11: Artistieke weergave van hoe de black-out van 13 maart 1989 in het Canadese Québec er vanuit de ruimte zou kunnen hebben uitgezien, met bovenaan het normale uitzicht. (Credits: NASA)

Jansens Revue E 17/02/14 15:20 Page 7

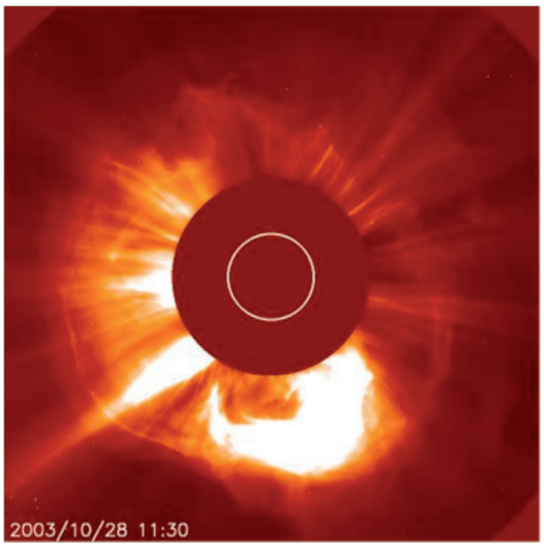

Fig. 12: De halo CME die gepaard ging met de grote zonne-uitbarsting van 28 oktober 2003 bereikte de aarde reeds na 19 uur en leidde tot een zware geomagnetische storm. (Credits: SOHO)

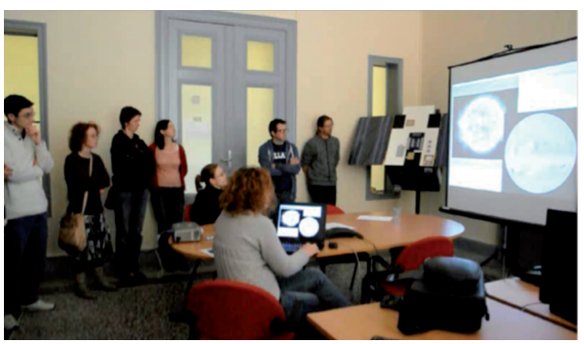

Fig. 13: Enkele ruimteweervoorspellers van het SIDC/RWC tijdens hun wekelijkse bijeenkomst.

Het meest tot de verbeelding sprekende gevolg was wel het effect van de GICs die door de impact van de CME werden gecreëerd. Deze creëerden ernstige problemen in het elektriciteitsnetwerk van de Canadese provincie Québec. In nauwelijks 90 seconden stortte het netwerk in elkaar en als gevolg daarvan zaten de daaropvolgende 9 uur 6 miljoen mensen zonder elektriciteit. Deze black-out is één van de meest aangehaalde voorbeelden van welke invloed een geomagnetische storm kan hebben op onze technologie en maatschappij (Fig. 11).

Een recenter voorbeeld zijn de "Halloween stormen" van eind oktober 2003, zo genoemd omdat ze samenvielen met de Amerikaanse feestdag(en). In een periode van nauwelijks 2 weken verschenen toen tegelijkertijd 3 van de grootste zonnevlekkengroepen uit de vorige zonnecyclus. Samen produceerden ze tussen 19 oktober en 4 november 11 X-klasse zonnevlammen, waaronder de krachtigste zonnevlam ooit geregistreerd sinds het begin der röntgenwaarnemingen. Een andere krachtige zonne-uitbarsting had plaats op 28 oktober. Deze X17 staat nog steeds geklasseerd als de vierde krachtigste zonnevlam sinds 1976, en ging ook gepaard met de op 3 na krachtigste protonstorm over dezelfde periode. Astronauten op het ruimtestation ISS werden naar de meer beschermende ruimten gebracht, waardoor de bestraling met ongeveer 50 % afnam. Nauwelijks 19 uur na de zonne-uitbarsting kwam de CME (Fig. 12) reeds aan op aarde. Het magnetisch veld van de aarde werd zodanig ingedrukt dat geostationaire satellieten aan de dagzijde bloot kwamen te staan aan de zonnewind. Gedurende 24 uur waren er manuele interventies nodig vanuit de controle centra om de satellieten in positie te houden. Een satelliet operator vertelde dat het de meest veeleisende dagen waren uit zijn lange professionele carrière. De Canadese en Amerikaanse elektriciteitsmaatschappijen zagen behoorlijke problemen op hun netwerken, maar geen black-out. Die was voorbehouden voor Zweden, waar een transformator het begaf en de stad Malmö voor ongeveer een uur zonder elektriciteit zat. Poollicht werd waargenomen tot in Florida en de Middellandse Zee.

De zon een stap voor

De vraag is dus niet zozeer of er zich ooit een perfecte superzonnestorm zal voordoen, maar eerder wanneer deze zal plaats hebben.

Het is dan ook geen verrassing dat Europa zijn eigen centra heeft die het ruimteweer monitoren en voorspellen, en de nodige dienstverlening geven. Het Solar Indices Data analysis Centre (SIDC) in Ukkel, België, omvat naast het World Data Centre voor het zonnevlekkengetal (SILSO, Sunspot Index and Long-term Solar Observations) ook het ruimteweervoorspellingscentrum (Regional Warning Centre, RWC) voor West-Europa. De Pool Ruimte in Ukkel is ook de thuishaven van het Europees dienstverleningscentrum voor ruimteweer (SSA Space Weather Coordination Centre, SSCC), evenals van het PROBA2 Science Centre (P2SC) van waaruit de wetenschappelijke operaties en dataverwerking gecoördineerd worden van ESA's en de in België gebouwde zonnesatelliet PROBA2.

Het RWC bestaat uit een internationaal team van een achttal experten en wetenschappers die in beurten van telkens een week het ruimteweer in het oog houden. Ze maken hiervoor gebruik van online ruimteweerdata en –beelden, waarnemingen met eigen middelen (PROBA2, zonnetelescopen in Ukkel, radiowaarnemingen in Humain, geomagnetische waarnemingen in Dourbes, ...), en zelf ontwikkelde IT-tools. Op basis van al deze gegevens maken ze dan dagelijkse voorspellingen van de kans op zonnevlammen en protonstormen, en evalueren ze de mogelijke invloed van CMEs. Deze ruimteweerberichten worden per e-mail verzonden, en geïnteresseerde gebruikers kunnen zich gratis op de verspreidingslijst inschrijven. Elke vrijdag komen de ruimteweervoorspellers samen om de activiteit van de laatste week te overlopen (Fig. 13). De briefing kan live op het internet gevolgd worden (mits inschrijving).

Het wispelturige karakter van de zonneactiviteit in combinatie met de grote impact die zonnestormen op ons en onze technologie kunnen hebben, vereist dat we "onze" ster goed in het oog houden. De faciliteiten op het plateau Ukkel laten dit toe en maken dat onze ruimteweerexpertise op veel internationale bijval kan rekenen. Deze ruimteweervoorspellers en -dienstverleners zijn dan ook klaar om de rest van deze zonnecyclus van nabij op te volgen.

Jansens Revue E 17/02/14 15:20 Page 8

Zonnestormen en hun impact op elektrische netten

Dit artikel werd geschreven met o.a. financiële toelagen van het European Commission's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) onder het project eHeroes (n° 284461, www.eheroes.eu).

De auteurs



Petra Vanlommel deed tijdens haar doctoraat theoretisch onderzoek naar geluidsgolven in de zon in het domein helioseismologie, om vervolgens aan de slag te gaan aan de Koninklijke Sterrenwacht van België als productontwikkelaar en voorspeller voor het ruimteweerscentrum. Nu spendeert ze al haar tijd aan wetenschapscommunicatie voor het Solar-Terrestrial Centre of Excellence, een thematisch overkoepelende structuur rond zon-ruimte-aarde.



Jan Janssens behaalde zijn diploma Industrieel Ingenieur Vliegtuigmechanica in 1992. Hij doet al ruim 30 jaar zonnewaarnemingen, schreef het boek “Zon en Aarde: Een unieke relatie” (2003), en onderhoudt eveneens een website over de zonneactiviteit en het ruimteweer. Binnen het STCE, dat hij vervoegde in 2012, is hij o.a. verantwoordelijk voor de communicatie over de zonnecyclus, zonneactiviteit en het ruimteweer. Hij is tevens ruimteweervoorspeller bij het SIDC/RWC.