

# Ruimteweer: geschiedenis en voorspelling

**E**r zijn verschillende versies van wat ruimteweer nu is. Wij hanteren de officiële definitie van ESA: “toestanden op de Zon en in de zonnewind, magnetosfeer, ionosfeer en thermosfeer die de werking en betrouwbaarheid van technologische systemen op Aarde en in de ruimte beïnvloeden en die de gezondheid aantasten.”

In deze eerste bijdrage vertellen we het verhaal van de geschiedenis van het ruimteweer en leggen we uit hoe voorspellingen worden gemaakt op het Solar Influences Data-analysis Center (SIDC) van de Koninklijke Sterrenwacht van België.

## Geschiedenis van ruimteweer

In de negentiende eeuw was het beeld van het zonnestelsel gebouwd op de fundamenteën van de hemelmechanica. De planeten, manen, planetoïden en kometen beïnvloeden elkaar door middel van de zwaartekracht die de verre leegte tussen de objecten overbrugt. De Zon speelt daarin een centrale rol omdat ze 99,9% van de totale massa van het zonnestelsel voor haar rekening neemt. Het was niet vanzelfsprekend dat de ruimte tussen de planeten gevuld zou zijn door een ijl gas dat een fysische verbinding

**Richard Carrington's waarneming in 1859 van een zonnevlam. De gebieden waar de zonnevlam zich voordeed, zijn aangeduid met letters. Bron: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.**

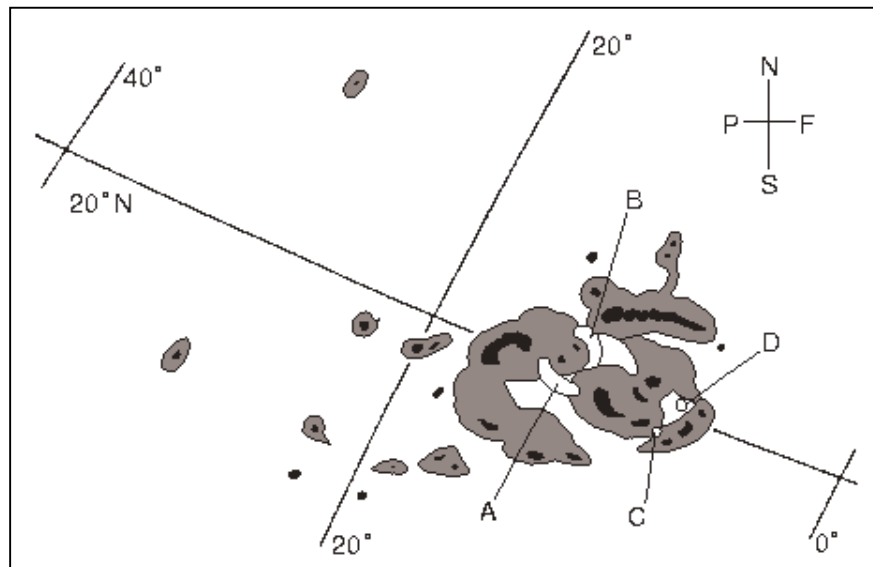
tussen Zon en Aarde vormt. Daarvoor waren eerst harde bewijzen nodig. Vooraleer ruimtetuigen deze ook onomstotelijk hebben gegeven, waren er aanwijzingen vanuit twee domeinen: de ontdekking van een correlatie tussen gebeurtenissen op het zonsoppervlak en storingen van het aardse magneetveld, en het gedrag van komeetstaarten.

## Op zoek naar de schakel tussen Zon en Aarde

Het verhaal begint bij de ontdekking van de zonneactiviteit. Vooraleer Galileo Galilei zijn telescoop voor het eerst naar de Zon had gericht, werden grote zonnevlekken al waargenomen met het blote oog. In West-Europa werden ze vaak verward met overgangen van de planeten Mercurius of Venus. Sinds Galilei worden zonne-

vlekken systematisch waargenomen, waarbij er een verminderde activiteit in het aantal zonnevlekken werd waargenomen tijdens de achttiende eeuw (Maunder minimum). In de negentiende eeuw ontdekte Samuel Heinrich Schwabe dat het aantal zonnevlekken varieert met een elfjarige cyclus. Dit zette Rudolf Wolf ertoe aan om de zonneactiviteit te karakteriseren door een Zonnevlekgetal dat rekening houdt met de omstandigheden van elke waarneming, wat onderling vergelijken vergemakkelijkt. Dit getal is nog steeds in gebruik en wordt sinds 1981 onderhouden door het SIDC onder leiding van Pierre Cugnon.

Het is de eerste september 1859. Tijdens een routine zonnewaarneming bemerkte Richard Carrington “twee heldere plekken van intens licht” in een grote zonnevlekkengroep. Het



verraste hem dat deze plekken snel evolueerden. Hij maakte in feite de eerste waarneming van een zonnevlam (zie afbeelding links). Toen hij er iemand anders bij ging halen om zijn waarneming te bevestigen, was hij verontwaardigd omdat de plekken in tussentijd al heel zwak geworden waren. Maar onafhankelijk heeft Hodgson toch zijn waarneming kunnen bevestigen. Tijdens de volgende nacht vond de grootste geomagnetische storm (de terminologie stamt af van Alexander von Humboldt) plaats die ooit werd gemeten en het noorderlicht was zelfs zichtbaar tot in Puerto-Rico. Carrington vond het voorbarig om wat hij waarnam op de Zon als oorzaak te nemen voor dit gebeuren. Maar George Fitzgerald durfde dit wel en in 1892 berekende hij uit het tijdsverschil tussen de passage van een grote zonnevlekgroep aan de centrale meridiaan en een grote geomagnetische storm, dat een storing een snelheid van 300 km/s moet hebben om de afstand tussen Zon en Aarde te overbruggen. Oliver Lodge stelde in 1900 voor dat deze storing

een stroom geladen deeltjes is (corpusculaire straling).

Dit idee werd niet onmiddellijk positief onthaald, maar was interessant voor wetenschappers, zoals Becquerel en Goldstein, die het noorderlicht bestudeerden. Kristian Birkeland concludeerde immers in 1903 na een arctische expeditie dat het noorderlicht veroorzaakt wordt door de interactie van de aardatmosfeer met een straal van geladen deeltjes. Dit werd destijds bekritiseerd omdat zo'n straal niet in stand kan blijven omwille van elektrostatische afstoting. Dit spoorde dan weer Frederick Lindemann, en later Sydney Chapman en Vincent Ferraro, aan om geomagnetische stormen en noorderlicht te verklaren door een elektrische neutrale wolk van geladen deeltjes. Deze materie werd later door Irving Langmuir "plasma" genoemd. Nu weten we dat de Zon, haar atmosfeer en de interplanetaire ruimte bestaan uit een plasma.

Alhoewel het verband tussen zonnevlekken en grote geomagnetische stormen langzaam aanvaarding begon te vinden, was dit niet het geval voor

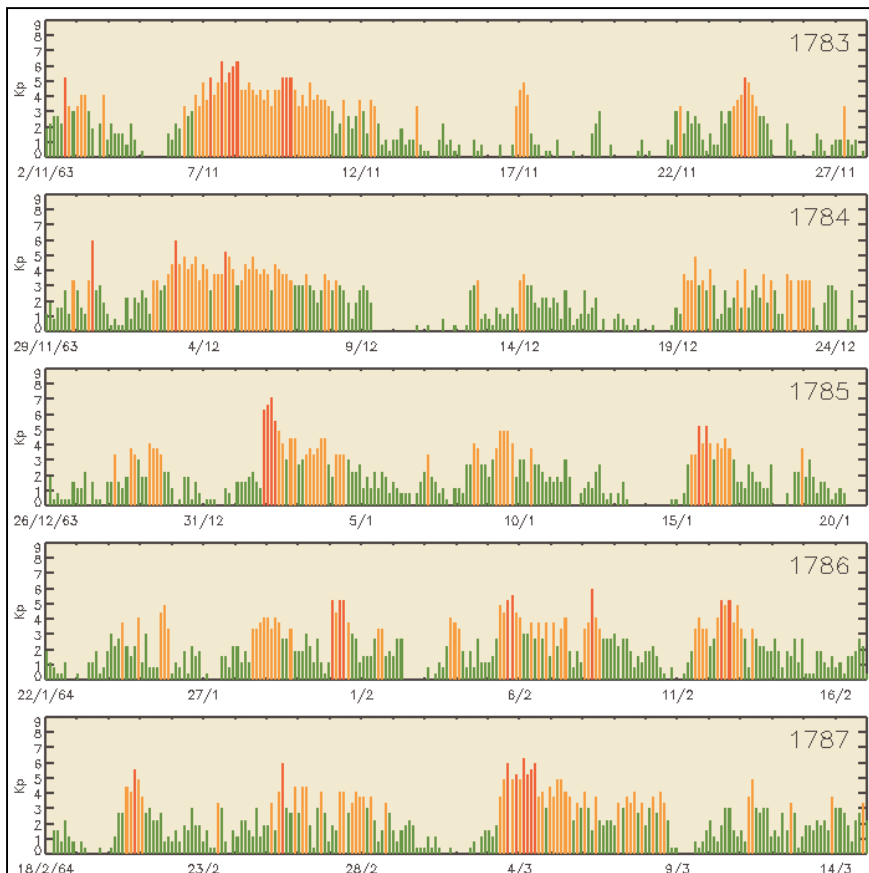
gematigde geomagnetische stormen. Julius Bartels verzamelde tussen 1932 en 1961 metingen van het aardse magneetveld en het viel hem op dat gematigde geomagnetische stormen de neiging hebben om de 27 dagen, één synodische zonneperiode, terug te keren (zie afbeelding hieronder). Hij postuleerde dat bepaalde gebieden op de Zon, door Walter Maunder M-gebieden genoemd naar "Magnetische storingen", hiervoor verantwoordelijk zijn. Het zou nog enkele decennia duren vooraleer de M-gebieden geïdentificeerd werden.

## Komeetstaarten

Een komeet verliest materie langsheen twee staarten. De ionenstaart bestaat uit lichte deeltjes die door het zonlicht geïoniseerd zijn. Hij staat recht van de Zon af gericht. De tweede staart is de stofstaart bestaande uit zwaardere stofdeeltjes. Deze staart is ook van de Zon af gericht maar heeft een gebogen vorm in de richting van de komeetbaan. Er moet een kracht zijn die van de Zon weg is gericht. Johannes Kepler stelde voor dat de druk van het zonlicht deze kracht uitoefent. Op Aarde is deze druk minuscuul maar in de ruimte heeft ze een belangrijke invloed op lichte deeltjes en grote oppervlakken. Vandaar bijvoorbeeld het idee van zonnezeilen. Voor het gemiddelde komeetstaartdeeltje is de versnelling door de lichtdruk 10% groter dan de zonnegravitatie.

Gedetailleerde waarnemingen toonden aan dat de lichtdruk alleen niet alles kan verklaren. In 1943 ontdekte Cuno Hoffmeister dat de ionenstaart niet exact van de Zon af gericht staat,

**De geomagnetische activiteit tijdens vijf zonnerotaties, samengesteld door Bartels. Deze afbeelding toont matige, periodiek terugkerende geomagnetische stormen die niet in verband kunnen gebracht worden met zonnevlekken. De geomagnetische activiteit wordt voorgesteld door de 3-uur Kp-index, die een gemiddelde is van de K-index van verschillende meetstations verdeeld over de hele wereld. De Kp-index heeft een logaritmische schaalverdeling die varieert tussen 0 (rustig) en 9 (grote storm). Figuur: gegevens van NGDC.**



maar een hoek van minder dan vijf graden met die richting maakt. Ludwig Biermann verklaarde dit door een continue stroom deeltjes, die radiaal van de Zon weg beweegt, in het leven te roepen. Omdat de komeetbaan niet evenwijdig is met de deeltjesstroom, zorgt aberratie ervoor dat de dynamische druk van de stroom de staartdeeltjes in een richting duwt die afwijkt van de radiale richting. Uit de hoek kan de snelheid van de deeltjesstroom bepaald worden en die bleek gelijk te zijn aan 470 km/s. Merk op dat er hier nood is aan een continue deeltjesstroom in tegenstelling tot de tijdelijke stroom voorgesteld om geomagnetische stormen te verklaren.

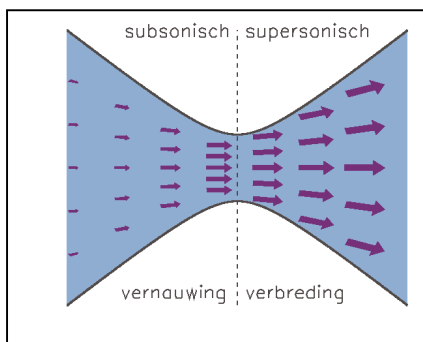
In de jaren vijftig bestudeerde Biermann achtereenvolgende foto's van komeetstaarten en vond regelmatig staartcomponenten die versnelden met een factor van honderd keer de zonnegravitatie. Ook dit is moeilijk door lichtdruk alleen te verklaren.

### Modellen van de uitgebreide corona

De waarnemingen en discussies gaven een aanzet tot theoretisch werk. Chapman stelde voor dat de corona statisch is en tot in de interplanetaire ruimte reikt. Maar deze theorie had één belangrijk gebrek: ze voorspelde een onrealistisch grote gasdruk op

**Hieronder. De werking van de opening van een stuwraak.**

**Rechts. De verschillende oplossingen van Parkers model in functie van de afstand tot het zonneoppervlak en de stroomsnelheid. De stroom begint aan een lage snelheid. Enkel de zonnebries en de zonnwind voldoen.**



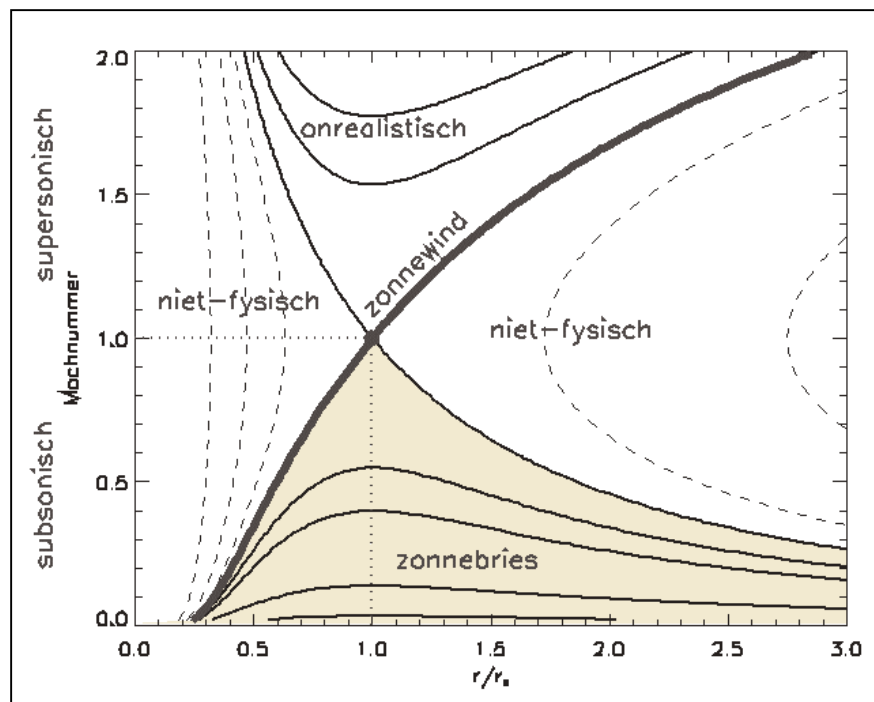
grote afstand. Een jaar later kwam Eugene Parker op de proppen met een alternatief. In plaats van dat de corona statisch is, zet ze continu uit om de interplanetaire ruimte te vullen. Deze uitzetting is het gevolg van de miljoenen graden hete temperatuur van de corona.

Deze theorie is analoog met de werking van de uitlaat van een stuwraak. Een gas op subsonische (supersonische) snelheid versnelt (vertraagt) als het in een vernauwing stroomt. Op zijn beurt vertraagt (versnelt) een gas op subsonische (supersonische) snelheid als het uit een vernauwing stroomt. Stel je een uitlaat voor die eerst vernauwt en dan verbreedt (zie afbeelding linksonder). Er zijn dan twee mogelijke scenario's als het gas een subsonische beginsnelheid heeft. Ten eerste, als de inkomende gasstroom een subsonische snelheid heeft die groot genoeg is, zal die in de vernauwing supersonisch worden. De verbreding zal dan de snelheid nog verder doen toenemen. Dit is het scenario waar de raketingenieurs op mikken. Ten tweede, als de inkomende gasstroom een te kleine snelheid heeft, zal die in de vernauwing niet supersonisch worden en zal de stroom in de verbreding zelfs terug vertragen. In het geval van de zonnecorona wordt de rol van de

vernauwing gespeeld door de zwaartekracht en de coronale temperatuur. De verbreding is het gevolg van de kwadratische vergroting van de ruimte met de afstand. Parker noemde de twee scenario's respectievelijk de "zonnwind" en de "zonnebries". Onderstaande afbeelding toont de verschillende oplossingen van zijn model in functie van de afstand tot de Zon en de snelheid. De afstand waarop de zonnwind supersonisch wordt, is omgekeerd evenredig met de temperatuur. Voor de zonnecorona ligt dit punt op een vijf zonnestrallen van het oppervlak. Toen Parker zijn theorie publiceerde, vond die niet veel weerklank.

### Ruimtetijdperk

Alle twijfel over het bestaan van de deeltjesstroom verdween en het pleit werd in het voordeel van Parker beslecht toen in 1959 de Russische sondes Lunik 3 en Venus 1 een stroom protonen vaststelden. Geen statische component werd gevonden. In 1961 mat de Amerikaanse satelliet Explorer 10 een deeltjesstroom met een dichtheid van 10 deeltjes per kubieke centimeter, een temperatuur van  $10^5$ - $10^6$  kelvin en een gemiddelde snelheid van 280 km/s. De stroom is supersonisch en komt overeen met



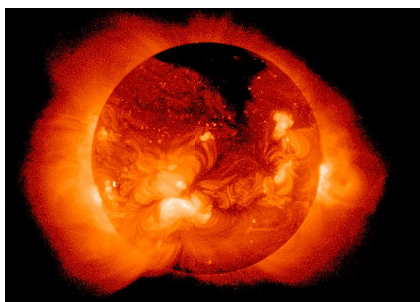
Parkers zonnewind. Ter volledigheid vermelden we dat de zonnewind ook succesvol wordt beschreven door een kinetische aanpak door onder andere Joseph Lemaire.

De corona straalt, omwille van de hoge temperatuur, in het röntgen en extreem-ultraviolet licht (tijdens een zonsverduistering of door een coronograaf zien we het fotosferische licht dat in de corona wordt verstrooid) en is niet toegankelijk vanop het aardoppervlak. Het is dus nodig om raketten of satellieten de ruimte in te sturen. In 1973 nam de röntgen-telescoop van Skylab een kijkje van de corona. De gebieden boven en rond zonnevlekken, actieve gebieden genoemd, bevatten intense magneetvelden en zijn helderder, dichter en heter dan hun omgeving. Maar Skylab zag ook uitgebreide gebieden die donkerder, ijler en kouder zijn dan hun omgeving. Het magneetveld is aldaar direct verbonden met de zonnewind. Deze gebieden werden coronale gaten genoemd. De mysterieuze M-gebieden werden uiteindelijk geïdentificeerd omdat coronale gaten de bron zijn van de snelle zonnewind.

In de jaren negentig werd veel vooruitgang geboekt dankzij de succesvolle satellieten Ulysses, Yohkoh en de Solar Heliospherical Observatory (SoHO). Ulysses passeerde de polen van de Zon tweemaal en mat de karakteristieken van de zonnewind in functie van de zonnebreedte. De Ex-

**Hieronder. Beeld van de zonnecorona die een coronaal gat toont, genomen door de satelliet Yohkoh in het zacht röntgenlicht.**

**Rechts. De basisstructuur van het heliosferische stroomvlak tijdens een zonneminimum. De aardbaan wordt ook getoond. De bronnen van de trage en snelle wind (coronaal gat) worden met oranje en blauw aangeduid.**



Heelal, oktober 2002

Eigenschap	Trage wind	Snelle wind
Snelheid (km/s)	400	700-900
Dichtheid (cm <sup>-3</sup> )	10	3
Protonen temperatuur (K)	4 • 10 <sup>4</sup>	2 • 10 <sup>5</sup>
Structuur	wisselvallig	uniform
Geassocieerd met	streamer	coronaal gat
Zonneminimum	ca. 15° boven evenaar	> 30 graden
Zonnemaximum	overall dominant	minder voorkomend

### Typische toestand van de zonnewind

treme-ultraviolet Imaging Telescope (EIT) en de Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO), beiden instrumenten op SoHO, hebben aangetoond dat de Zon erg dynamisch is en maken het mogelijk om de Zon continu in de gaten te houden.

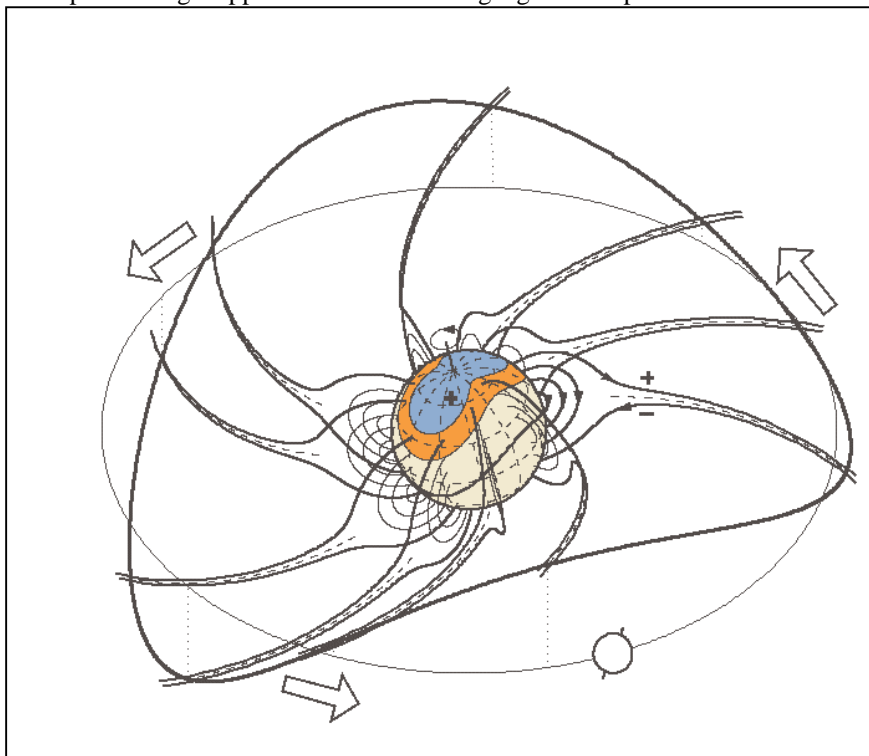
### De structuur van de zonnewind

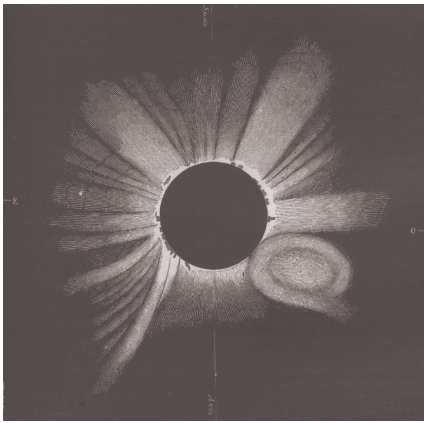
De eerste waarnemingen bevestigden Parkers zonnewindmodel. Parker voorspelde bovendien dat omwille van de rotatie van de Zon, de zonnewind een structuur van Archimedesspiralen heeft. Dit is analoog aan de vorm van een waterstraal uit een ronddraaiende tuinsproeier. In 1962 werd dit door de Venussonde Mariner 2 bevestigd.

De zonneatmosfeer is doordrongen van magneetvelden. In de corona is het plasma gekoppeld aan het

magneetveld en ligt dicht bij de Zon langsheen dat magneetveld. Met de afstand neemt de magnetische flux sneller af dan de plasmadruk zodat op grotere afstand het supersonische plasma het magneetveld met zich meesleept. Daardoor heeft het magneetveld de vorm van die Archimedes-spiraal. De spiraalstructuur maakt dat het magneetveld dat de Aarde passeert, afkomstig is van het westelijk halfrond van de zonneschijf. Energetische zonnedeeltjes (SEPs) ontstaan in een zonnenvlam aldaar, zullen het magneetveld volgen en de Aarde bereiken.

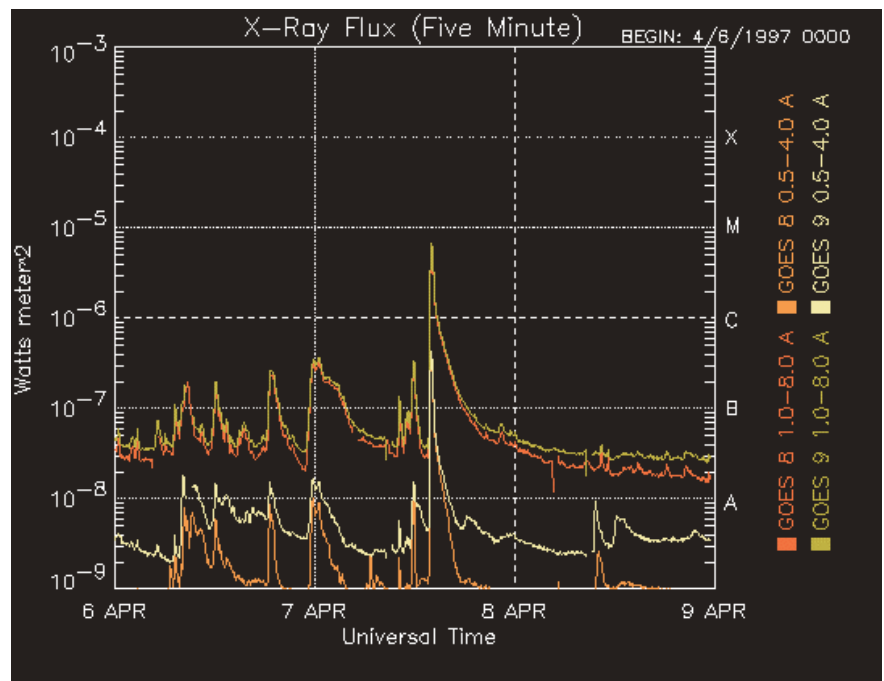
Tijdens het zonneminimum is het magneetveld van de Zon een dipool. Dit magneetveld is door de zonnewind uitgerekt. Nabij de evenaar wordt een heliosferisch elektrisch stroomvlak gevormd dat het magneetveld van tegengestelde polariteit in de twee





Boven. Tekening van de zonnecorona tijdens de totale zonsverduistering van 18 juli 1860. Bron: Ranyard in *Mem. Royal Astronomical Society*.

Rechts. Het geïntegreerd röntgenlicht gemeten door GOES op 7 april 1997 toont een C-type zonnevlam rond 14h.



halfvonden van elkander scheidt. De polen van het dipool magnetveld zijn meestal niet parallel met de rotatieas. Het stroomvlak krijgt daarom de vorm van een ballerinajurk (zie afbeelding rechtsonder op de vorige bladzijde). Tijdens een zonnemaximum is de structuur van het stroomvlak complexer en kunnen er zelfs meerdere stroomvlakken bestaan. De Aarde kan doorheen het stroomvlak bewegen waardoor de magnetische topologie van de zonnewind nabij de Aarde verandert. De Aarde wordt beschermd door de magnetosfeer. Deze bestaat uit een dipool magnetveld dat door de zonnewind aan de zonzijde samengedrukt wordt en aan de andere zijde tot een staart uitgerekt. Als de richting van het interplanetaire magnetveld (IMF) van noord naar zuid verandert, kan een deel van de staart van de magnetosfeer zich loskoppelen en wegdrijven. Dit wordt een geomagnetische substorm genoemd. Ook een komeetstaart kan zich tijdens een passage door het stroomvlak loskoppelen.

Er zijn twee soorten zonnewind, afhankelijk van het brongebied op de Zon: trage en snelle wind (zie tabel op de vorige bladzijde). De trage wind komt tijdens een zonneminimum vanuit gematigde breedtes boven de band van zonnevlekken. Deze wind stroomt nabij het stroomvlak. De

snelle zonnewind is tijdens het zonneminimum beperkt tot hoge breedtes. Tijdens het maximum zijn beide types zonnewind aanwezig nabij het evenaarsvlak en zijn ze erg wisselvallig. Als op dezelfde breedte een brongebied van de trage zonnewind wordt gevolgd door de snelle zonnewind, zullen door de rotatie van de Zon de twee brongebieden dezelfde plaats passeren en zal hierdoor de snelle wind inhalen en een complex schokgebied, dat Coroterende Interactie Regio (CIR) genoemd wordt, vormen. Wanneer deze regio de Aarde passeert, kan dat ook geomagnetische substormen veroorzaken.

### Hoe het ruimteweer voorspellen?

In 2000 nam het SIDC de dienst van ruimteweersvoorspellingen over van Meudon in Parijs en werd het de "Regional Warning Center" voor West-Europa. Het SIDC stelt dagelijkse bulletins op van voorspellingen voor zonnevlammen en het aantal protonen. Het maakt ook voorspellingen van de 10.7 cm radioflux van de Zon en de regionale geomagnetische activiteit voor de komende drie dagen. Daarenboven worden waarschuwingen verstuurd van zodra een belangrijke gebeurtenis zich in het

ruimteweer voordoet. Meer informatie vind je op de website van het SIDC (<http://sol.oma.be>). Op de Sterrenwacht van België lossen wij elkaar wekelijks af om het ruimteweer in de gaten te houden en om de voorspellingen van het SIDC te versturen. Wat voorspellen we en hoe worden die voorspellingen gemaakt?

### Wegwijs in het zonneweer

Zonnevlammen zijn één van de snelste en meest energetische gebeurtenissen op de Zon. Tijdens een zonnevlam wordt een grote hoeveelheid verzamelde magnetische energie vrijgegeven in een korte tijdspanne. Wetenschappers nemen zonnevlammen waar in vele verschillende golflengtes, van laagenergetische radiogolven tot hoogenergetische gammastralen. De Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) observeert in de eerste plaats de Aarde, maar er is ook een monitor voor röntgenstralen aan boord die het geïntegreerde röntgenlicht van de Zon meet. De intensiteit van het röntgenlicht van zonnevlammen wordt gemeten in watt per vierkante meter. De röntgenklassen A, B, C, M en X stellen de toenemende numerische waarde voor van de intensiteit van zonnevlammen (zie afbeelding links).

Het verstrengelde en verrokken magnetische veld boven zonnevlekken is de plaats waar zonnevlammen voorkomen. De magnetische classificatie van actieve gebieden is een goede indicator voor de magnetische complexiteit. In recente magnetogrammen kijken we dan ook naar sterk verrokken magneetvelden. Een andere manier om de kans op zonnevlammen in de nabije toekomst te voorspellen, is door naar zonnevlekkengroepen te kijken. Zonnevlekkengroepen worden in zestig McIntosh klassen ingedeeld, gebaseerd op de totale magnetische flux in het actief gebied en het magneetveld van de grootste zonnevlek in de groep. Om voor een bepaalde zonnevlekkengroep de kans op een zonnevlam en zijn intensiteit te voorspellen, kijken we naar de kansen voor het voorkomen van C, M en X-type zonnevlammen die zijn gebaseerd op statistieken van zonnevlekkengroepen van dezelfde McIntosh klasse. Daarenboven, om na te gaan welk actief gebied ook daadwerkelijk actief is, kijken we naar de recente zonnevlammen in het röntgenlicht gemeten door GOES. De gemeten intensiteit van zonnevlammen hangt sterk af van het niveau van de achtergrond van röntgenstralen. Complexe configuraties kunnen enkel type C zonnevlammen produceren omdat het achtergrondniveau laag is, en vice versa.

De radioemissie van de Zon bij een golflengte van 10.7 centimeter, vaak de "10.7 cm flux" genoemd, is goed gecorreleerd met het zonnevlekkengetal. Het zonnevlekkengetal wordt berekend uit het aantal individuele zonnevlekken en zonnevlekkengroepen en wordt herleid tot een standaard schaal door de verschillen in waarnemingsinstrumenten en -technieken mee in rekening te brengen. In tegenstelling hiermee kan de 10.7 cm flux snel en gemakkelijk gemeten worden en heeft die daarom voor vele doeleinden de plaats van het zonnevlekkengetal ingenomen.

Om de 10.7 cm radioflux van de Zon te voorspellen, moet met verschillende bijdrages rekening gehouden worden. Vooreerst vergelijken we de recente radioflux van verschillende observatoria overal ter wereld. Dan kijken we

naar de oostrand van de zonnenschijf naar de verschijning van terugkerende zonnevlekkengroepen en naar de westrand naar de zonnevlekkengroepen die net achter de rand verdwenen zijn. Deze dragen respectievelijk bij tot een toename en afname van de 10.7 cm flux. De bijdrages komen niet enkel van de vlekken zichtbaar op de zonnenschijf maar ook van die aan en net achter de rand omdat de radioflux in de atmosfeer gevormd wordt. Daarom is het belangrijk om naast het kijken naar de fotosferische zonnenschijf ook de te verschijnen en de net verdwenen zonnevlekken mee in ogenschouw te nemen. We kijken ook naar de aanwezigheid van coronale gaten op de zonnenschijf want ze dragen bij tot een afname van de 10.7 cm flux. Tot slot worden voorspellingen mogelijk aangepast door te vergelijken met de trend van één zonnerotatie, dus 27 dagen tevoren.

Het verband tussen zonnevlammen en geomagnetische stormen, voorgesteld door Fitzgerald en Lodge, komt van grootschalige storingen, die "Coronal Mass Ejections" (CMEs) heten en die de Aarde op hun pad ontmoeten. Een CME is een snelle gebeurtenis waarbij een gedeelte van de corona van de Zon in de ruimte wordt geslingerd. Door de Zon nauwgezet te volgen, kunnen CMEs ontdekt worden die mogelijk naar ons toe bewegen. Soms kunnen wij een CME voorspellen maar meestal worden ze eerder waargenomen dan voorspeld. De eerste gedocumenteerde waarneming van een CME dateert van de totale zonsverduistering van 1860 (zie afbeelding linksboven op de vorige bladzijde). Vooralere we een CME in de coronografen van LASCO waarnemen, kunnen we al vermoeden dat er één zal plaatsvinden door het voorkomen van een langdurige zonnevlam of een "disparition brusque" van een prominens. Prominensen zijn wolken van dichte en koude materie in de corona. Er zijn inderdaad twee types van CMEs. Het eerste type CME is geassocieerd met zonnevlammen (langdurige zonnevlammen in het bijzonder). Ze hebben een snelle beginsnelheid van om en bij de 700 km/s, maar versnellen nauwelijks. Het tweede type CME begint traag aan een

snelheid van 10-20 km/s maar versnelt aanzienlijk (tot 50 m/s<sup>2</sup>). Dit type is geassocieerd met prominenseruptions (zie onderstaande afbeelding).

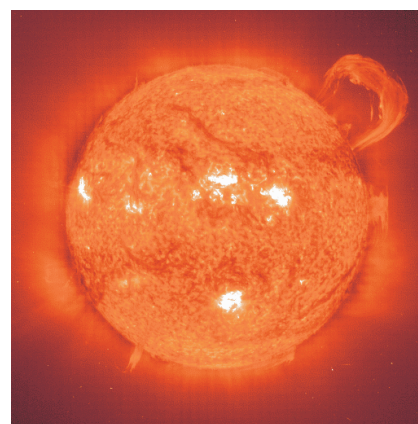
We kunnen ook een CME vermoeden eens we andere fenomenen waarnemen die ermee gepaard gaan: EIT verzwakkingen (EIT golf) die het gemakkelijkst te zien zijn in een film van EIT FeXII 195Å differentiële beelden (zie afbeelding bovenaan op de volgende bladzijde), en type II radiouitbarstingen die duiden op een CME schokfront. De radiowaarnemingen zijn ook uniek in die zin dat ze informatie geven over een CME terwijl ze door de interplanetaire ruimte reist. Vooralere de CME de satellieten ACE, de Advanced Composition Explorer, en SoHO passeert in het Langrangiaanse punt L1 tussen Zon en Aarde, gebruiken we de radiodata om de vooruitgang van de CME te volgen.

## Wegwijs in de schakel tussen Zon en Aarde

De koppeling tussen de zonnewind en het aardse magneetveld is veel sterker als het interplanetaire magneetveld (IMF) zuidwaarts is gericht, en des te sterker des te langer de duur. We letten in de ACE gegevens op een negatieve waarde voor de noord-zuid component van het IMF, Bz, die kleiner is dan -10 nT.

Over het algemeen drijft de snelle zonnewind de activiteit van het noorderlicht aan. Met CELIAS/SoHO

**Een prominenseruption (aan de noordwestrand) waargenomen door EIT/SoHO op 14 september 1999 om 7.19 h UT bij een golflengte van 304Å.**

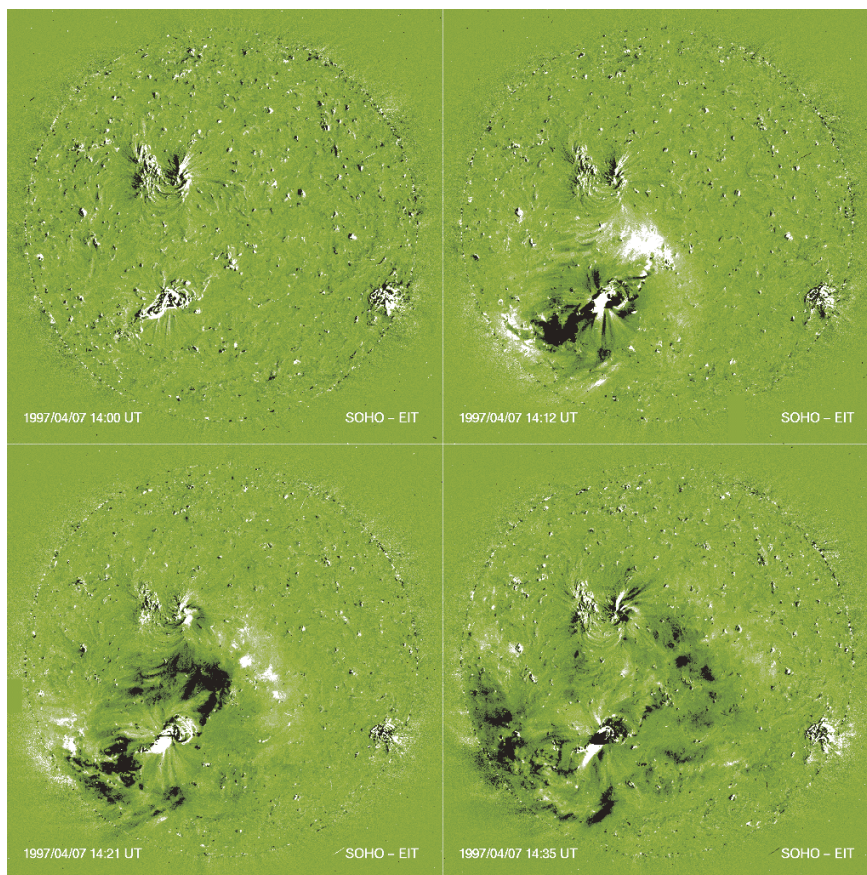


en/of ACE gaan we na of de snelheid van de zonnewind groter is dan 500 km/s. Het is geweten dat de snelle zonnewind afkomstig is uit coronale gaten. Coronale gaten zijn geassocieerd met “open” magnetische veldlijnen en bevinden zich meestal aan de polen van de Zon. Maar vooral tijdens een zonnemaximum kunnen ze ook op lagere breedtes verschijnen. Windstoten van de coronale gaten kunnen tegen de aardse magnetosfeer opbotsen. We kijken dan ook uit naar een coronaal gat dat zich aan de westelijke zijde van de centrale meridiaan bevindt, want de zonnewind die er vertrok ten tijde dat het coronaal gat de centrale meridiaan passeerde, zal dan de Aarde bereiken.

We kunnen ook een plotse toename in de snelheid van de zonnewind constateren wanneer de schokgolf van een CME de satelliet passeert (zie figuur rechtsonder). We kijken naar de meest recente activiteitenverslagen en filmen van de LASCO coronografen (zie foto bovenaan de volgende bladzijde). Gezien vanaf de zijkant ziet een CME eruit als een gigantische, opstijgende zeepbel, vele malen groter dan de Zon. Wanneer een CME in het centrum van de zonneshijf (voor of achter) uitbarst, zien we ze uitzetten in alle richtingen rondom de Zon. Dit wordt een halo CME genoemd.

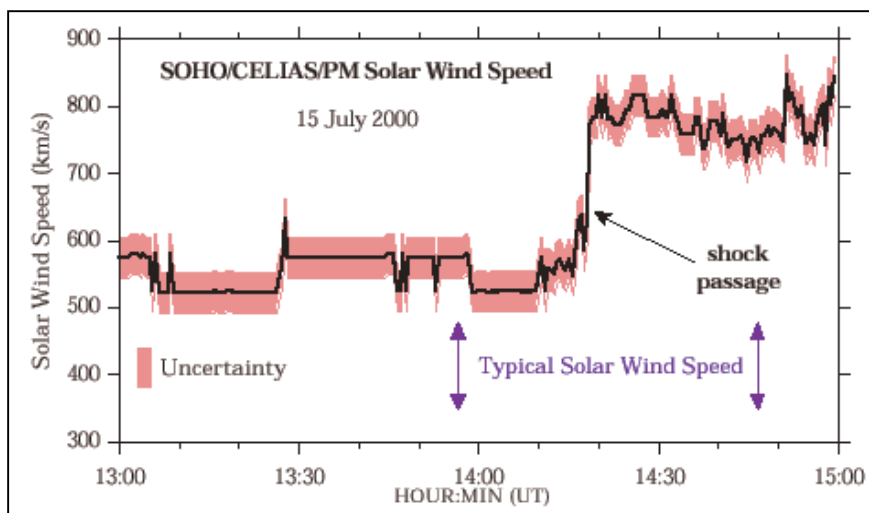
Een halo CME aan de voorkant van de Zon heeft het potentieel om de Aarde te passeren en om grote geomagnetische stormen te veroorzaken wanneer het magneetveld in de CME zuidwaarts is gericht. Om het verschil te zien tussen een halo CME aan de voorkant of aan de achterkant, gebruiken we de differentiële EIT FeXII 195Å film want wanneer de CME aan de voorkant gebeurt, moeten we ze ook zien bewegen op de zonneshijf (zie foto rechtsboven). Als de CME zich aan de achterkant bevindt, zouden we geen storing zien op de zonneshijf.

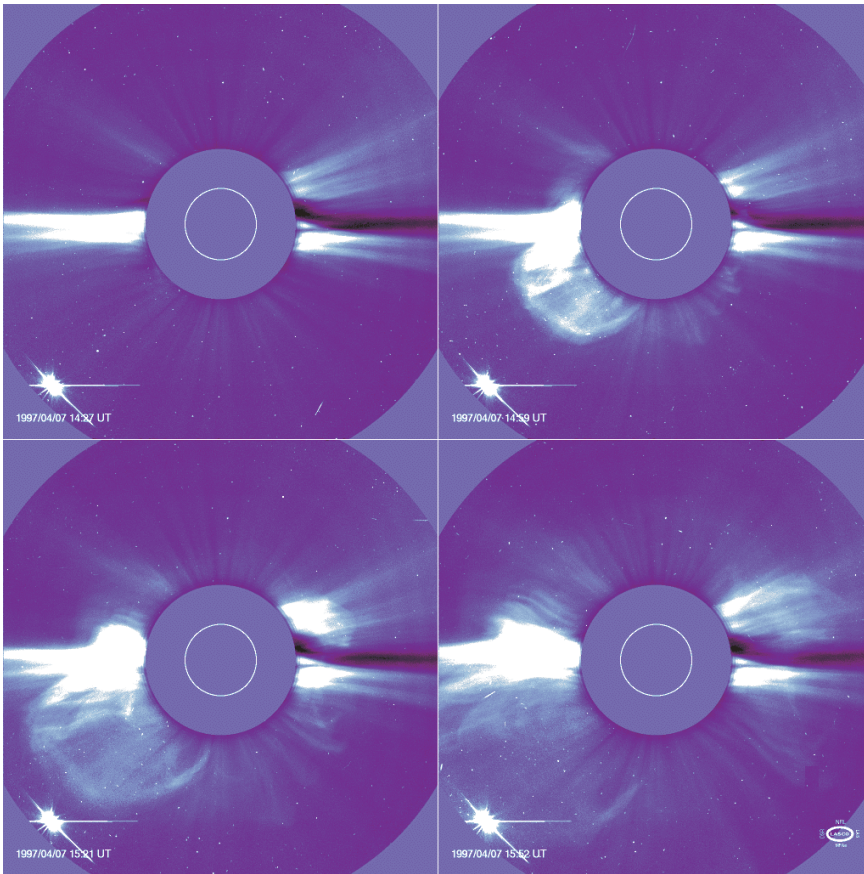
Er wordt aangenomen dat de voortplantingssnelheid van een CME verandert langsheen haar reis door de interplanetaire ruimte. Een CME met een beginsnelheid van 200 km/s doet er 4.5 dag over om de Aarde te bereiken, terwijl een snelle CME met een beginsnelheid van 1000 km/s er



**Boven.** Reeks opeenvolgende EIT/SoHO beelden die een schokgolf tonen die over de zonneshijf heen loopt. Omdat de schok relatief moeilijk te zien is, tonen we hier differentiële beelden waarbij telkens het verschil met het voorgaande beeld genomen wordt. De schokgolf is ontstaan in de buurt van een zonnevlam in een actief gebied, dat begon op 7 april 1997 om 13.59 h UT. Later werd een grote halo CME waargenomen met LASCO (zie foto rechts).

**Onder.** De snelheid van protonen in de zonnewind gemeten door de CELIAS/PM sensor aan boord van SoHO. We zien de passage van een CME schokgolf die de Zon op 14 juli 2000 verlaten heeft. De reistijd van de schok bedroeg 28 uur, wat zich vertaalt in een gemiddelde snelheid van 1500 km/s. De zonnewind achter de schok is ongeveer dubbel zo snel als de typische zonnewind.

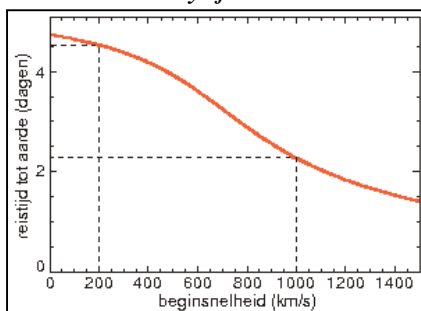




Reeks beelden genomen door de LASCO C2 coronograaf die de grote CME van 7 april 1997 toont. Een coronograaf is een instrument die de lichtzwakke buitenste contouren van de corona toont door de heldere zonnenschijf af te dekken. Het eerste beeld toont de corona net voor de uitbarsting. De beginfase van die uitbarsting is zichtbaar in de linkse benedenhoek. Ze wordt vervolgens een halo CME, die in het laatste beeld als een verheldering helemaal rondom de Zon zichtbaar is.

maar 2.25 dagen over doet. We kunnen de geprojecteerde beginsnelheid in het vlak van de hemel meten door te kijken naar LASCO beelden. Een CME gaat vaak gepaard met een type II radiouitbarsting. Door

**Voorspellingscurve voor de passage van een CME voorbij de Aarde. Bron: Catholic University of America.**



middel van radiospectroscopie kan ook hiermee de beginsnelheid achterhaald worden. De aankomsttijd van de CME bij de Aarde wordt vervolgens geschat door zich te baseren op empirische gegevens of numerische simulaties (zie voorspellingscurve linksonder).

### Wegwijs in de toestand aan de Aarde

We zijn op uitkijk naar een toename van het niveau van de inkomende flux van protonen (zie de bovenste curves van de figuur op de volgende bladzijde). Een waarschuwing wordt gegeven wanneer de flux de limiet, aangegeven door een streepjeslijn, overschrijdt. Elektronen worden ook door GOES gemeten (zie de tweede

curves van de afbeelding op de volgende bladzijde). De impact van hoogenergetische (relativistische) elektronen kunnen elektrische ontla- dingen veroorzaken in componenten in satellieten die tot storingen en zelfs permanente schade kunnen leiden.

Deeltjes worden versneld volgens twee onafhankelijke mechanismen. Ten eerste produceren zonnevlammen grote hoeveelheden energetische deeltjes (de zogenaamde SEPs, Solar Energetic Particles, zijn protonen, elektronen en zwaardere ionen) die de interplanetaire ruimte bereiken. Vooral zonnevlekkengroepen aan de westelijke zijde van de zonnenschijf vormen een risico. Het tweede mecha- nisme heeft te maken met CMEs. De meeste grote SEP gebeurtenissen ten gevolge van protonen zijn het resultaat van een versnelling van protonen in de zonnwind door de interplanetaire schokgolf van een CME. Ruimte- weersvoorspellingen zullen ooit kun- nen profiteren van CME schok- modellen die momenteel in ont- wikkeling zijn.

Geomagnetische stormen worden in drie etappes geobserveerd: in L1, in een geostationaire baan en op Aarde. In L1 nemen we een CME front of een snelle zonnwindstoot van een coronaal gat waar en waarschuwen op korte termijn wanneer die de Aarde bereikt. In een geostationaire baan meet de magnetometer aan boord van de GOES satelliet (zie de derde curves op de figuur op de volgende bladzijde) de gemiddelde noord-zuid component van het magneetveld. Als deze gelijk aan of kleiner dan nul wordt wanneer de satelliet zich aan de dagzijde bevindt, is dit te wijten aan het samendrukken van de magnetosfeer tot binnen de geostationaire baan. De satelliet meet dan een zuidwaarts gericht en/of erg fluctuerend magneet- veld. Op de nachtzijde duidt een zuidwaarts gericht magneetveld op een intensificatie van elektrische stromen in de staart van de magnetosfeer en die geassocieerd zijn met substormen. Grote fluctuaties in het aardse magneetveld worden geregistreerd door magnetogrammen op Aarde. Geomagnetische storingen worden gekarakteriseerd door verschillende lokale indices, waarvan



**GOES satelliet waarneming van 14-16 juli 2000.**

de K-index er één van is (zie het onderste diagram van de afbeelding hiernaast).

In het tweede deel zullen wij een voorbeeld geven van een zonne-uitbarsting die een geomagnetische storm heeft veroorzaakt, waarbij noorderlicht in België zichtbaar was. Verder worden de algemene gevolgen van het ruimteweer op de Aarde en de mens uitgediept.

