



Wat heeft de  
heliosfeer te maken  
met de aarde?

# Magnetosferisch onderzoek op het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA)

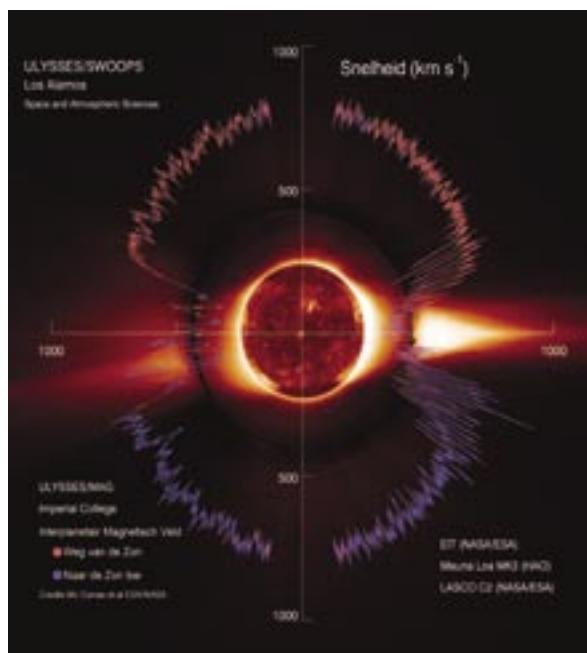
De aarde vertoeft binnen de heliosfeer, de ruimte die wordt gedomineerd door de zon en de zonnewind (zie ook pagina 3). De wisselwerking tussen zonnewind en aardmagnetosfeer heeft een impact op mens en technologie. Het onderzoek van het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie probeert de geheimen van deze wisselwerking te ontrafelen om zo beter de effecten ervan op de menselijke activiteit te kunnen inschatten.

## De zonnewind

Het BIRA was betrokken bij de interpretatie van de waarnemingen van Ulysses, een ESA/NASA-satelliet gelanceerd in 1990, die nog steeds een gestadige stroom meetresultaten doorstuurt na meer dan 17 jaar... Ulysses heeft ontdekt dat de zonnewind afkomstig van de noord- en zuidpool van de zon een snelheid heeft van een slordige 800 km/s, terwijl de snelheid nabij de evenaar "slechts" 400 km/s bedraagt. De zonnewind sleurt het magneetveld van de zon met zich mee. Dat magneetveld heeft tegengestelde polariteit in de noordelijke en zuidelijke hemisfeer, met daartussenin de zogenaamde "heliosferische stroomlaag". Toen de zon, de aarde en Ulysses op een bepaald moment op één lijn stonden hebben de wetenschappers van het BIRA kunnen aantonen hoe de zonnewind en de heliosferische stroomlaag evolueren en vervormen met toenemende afstand tot de

zon. Zij bestuderen de zonnewind ook met behulp van theoretische modellen gebaseerd op de microfysica van een plasma. Zo heeft het BIRA de laatste jaren een bijdrage geleverd aan het vraagstuk van de verhitte van de corona en van de hoge snelheid van de zonnewind.

*Ulysses meet grotere snelheden van de zonnewind aan de polen dan aan de evenaar van de zon.*  
© NASA/ESA



## De magnetosfeer

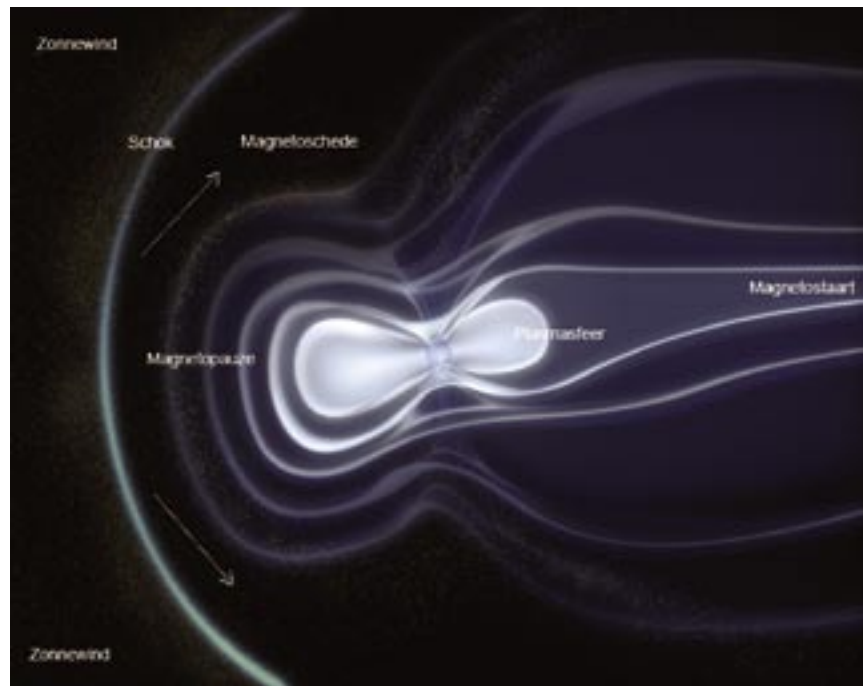
De aarde bezit een magnetisch veld dat binnenin de planeet wordt opgewekt. Dit magneetveld vormt als het ware een schild dat de zonnewind belet om binnen te dringen in de hoge atmosfeer. Dit magneetveld vormt de *magnetosfeer*. Stroomopwaarts van de aarde vinden we de *magnetopauze*, die de zonnewind scheidt van het plasma dat afkomstig is van de aardatmosfeer. De zonnewind wordt opzij geduwd en stroomt langs de aarde heen in de *magnetoschede*. De magnetosfeer is samengedrukt langs de dagzijde; langs de nachtzijde wordt ze uitgerekt in een *magnetostaart* van wel miljoenen kilometers lengte.

In 2000 lanceerde ESA de CLUSTER-missie, vier satellieten die om de aarde bewegen langs eenzelfde baan. De afstand tussen de vier varieert van enkele honderden tot een paar duizend kilometer. Het is de bedoeling om meer inzicht te krijgen in de driedimensionale structuur van de magnetosfeer. Het BIRA helpt mee bij de interpretatie van de meetgegevens.

De magnetopauze is de sleutel tot het begrijpen van de interactie tussen de heliosfeer en de aarde: daar immers wordt een deel van de energie van de zonnewind doorgegeven aan de magnetosfeer. De magnetopauze gedraagt zich dikwijls als een ondoordringbare laag. Dat gegeven is ook verwerkt in het model van zijn inwendige structuur dat op het BIRA werd gemaakt. Regelmatig laat de magnetopauze echter wel zonnewind binnendringen in de magnetosfeer, door diffusie, impulsieve binnendringing, of door rechtstreekse instroom wanneer de magnetopauze van karakter verandert, mechanismen die ook in het BIRA bestudeerd zijn. Aan de binnenzijde van de magnetopauze vormt er zich dan een laag met een mengsel van plasma afkomstig van de zon en van de aarde: de *magnetosferische grenslaag*.

De magnetopauze situeert zich waar de dynamische druk van de aanstromende zonnewind precies gelijk is aan de druk in de magnetosfeer. Met CLUSTER kon de "reconstructietechniek" ontwikkeld op het BIRA verder vervolmaakt worden. Door de metingen van alle satellieten gedurende de passage doorheen de magnetosferische grenslaag met elkaar te combineren, zijn we in staat om de beweging en de interne ruimtelijke structuur ervan te bepalen. Zo kan je de ruimtelijke veranderingen en de veranderingen in de tijd van elkaar onderscheiden. Daarbij vinden we inderdaad dat de magnetopauze dicht bij de aarde komt wanneer de druk van de zonnewind toeneemt, en dat ze zich verder af bevindt wanneer de druk afneemt.

De druk van de zonnewind is beduidend hoger in een plasmawolk afkomstig van een explosie in de zonneatmosfeer, een zogenaamde *coronale massa-uitstoot (CME)*, zie kader op pagina's 10 en 11). Wanneer zo'n wolk de aarde bereikt, wordt de magnetosfeer samengedrukt en ontstaat er een



*magnetosferische storm*. Tijdens een storm kunnen geostationaire satellieten plots aan de zonnewind worden blootgesteld, terwijl ze daarvoor nog in de beschermende magnetosfeer zaten. Dit kan fatale defecten veroorzaken. De schokgolven rond de plasmawolk en de snelle samendrukking van de magnetosfeer werken als deeltjesversnellers: de versnelde deeltjes bombarderen satellieten en kunnen hun elektronica danig in de war sturen...

## De binnenste regionen van de magnetosfeer en de ionosfeer

De koppeling tussen de zonnewind en de magnetosfeer veroorzaakt een typisch stromingspatroon in het magnetosferische plasma. Dat stromingspatroon is in staat energie op te slaan in een reservoir in de magnetostaart. Tijdens een magnetosferische *substorm* (een *light*-versie van magnetosferische storm) ontlaat die opgeslagen energie zich plots, met mogelijk fel poollicht tot gevolg.

De aardmagnetische veldlijnen verbinden de magnetosfeer en de ionosfeer. Ze gedragen zich als goede elektrische geleiders. Daarom weerspiegelt elke structuur in de magnetosfeer zich in de ionosfeer: elektrische stromen gaan vloeien en zetten de energie opgeslagen in de magnetosfeer om in een opwarming van de ionosfeer. Het BIRA bestudeert het poollicht als een typisch voorbeeld van deze energieoverdracht. Poollichtgordijnen ontstaan wanneer versnelde elektronen afkomstig uit de magnetosfeer de atmosfeer bombarderen. Daarbij gebruikt men een model van grenslagen in plasma's om de elektrische structuur in de

De belangrijkste elementen van de aardse magnetosfeer.

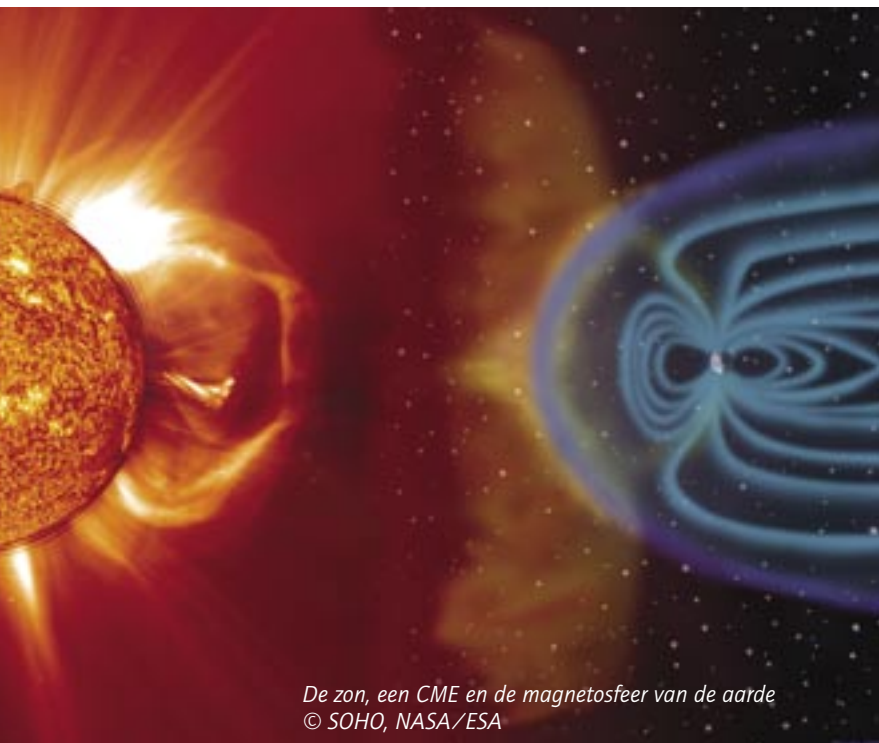
© BIRA

Poollicht (aurora) in alle kleurenpracht. © BIRA



magnetosfeer te bepalen. Rekening houdend met het koppingsmechanisme met de ionosfeer is dan de versnelling van de elektronen te berekenen en weet men hoeveel versnelde elektronen er in de ionosfeer terechtkomen en hoe groot de intensiteit van het poollicht is. Dit model verklaart onder andere waarom poollichtgordijnen slechts enkele kilometers breed zijn. In het BIRA bekijkt men poollicht vanuit de ruimte (CLUSTER vliegt doorheen de zone waarin de elektronen versneld worden) en vanop de grond, zoals met het Zweedse ALIS-netwerk van optische camera's dat tomografie van het poollicht toelaat.

Dichter bij de evenaar bevindt zich boven de ionosfeer de *plasmasfeer*, een gebied met plasma dat gevangen wordt door het aardmagnetisch veld. De buitengebieden van de plasmasfeer zijn erg dynamisch. Dit is het "slagveld" tussen de binnenste en de buitenste magnetosfeer, waar de met de aarde mee roterende plasmasfeer oog in oog staat met het stromingspatroon dat wordt opgelegd door de wisselwerking tussen magnetosfeer en zonnewind. Gedurende een substorm of een storm is dit stromingspatroon erg verstoord, met als gevolg dat de plasmasfeer zijn buitenlagen verliest. Nadien herstelt de plasmasfeer zich langzaam door mate-



De zon, een CME en de magnetosfeer van de aarde  
© SOHO, NASA/ESA

## CME, Coronal mass ejection of coronale massa-uitstoot

Het magneetveld van de zon zorgt voor een thermische isolatie en kan een plasma opsluiten, bijv. in een enorme magnetische fluxbuis of een coronale lus die tot 700.000 km lang kan zijn. Hierdoor kan zeer heet plasma vlak naast kouder plasma voorkomen in de atmosfeer van de zon. De magnetische structuren in de corona van de zon geleiden golven en energiestromen en kunnen enorme hoeveelheden energie opslaan. Ze kunnen echter plots instabiel worden en aanleiding geven tot zonnevlammen en coronale massa-uitstoten (CME's of *coronal mass ejections*).

Bij een CME wordt materiaal uit de buitenlagen van de zon geslingerd. Het gaat ook om plasma, maar de snelheid kan veel hoger zijn dan bij de gewone zonnewind. Zogenaamde "snelle CME's" hebben een typische snelheid van 1000 km/s en die snelheden kunnen oplopen tot meer dan 2000 km/s, meer dan 7,2 miljoen km/u dus! Er wordt typisch  $10^{12}$ - $10^{13}$  kg plasma uitgestoten bij een CME, wat ongeveer overeenstemt met de massa van de Mount Everest.

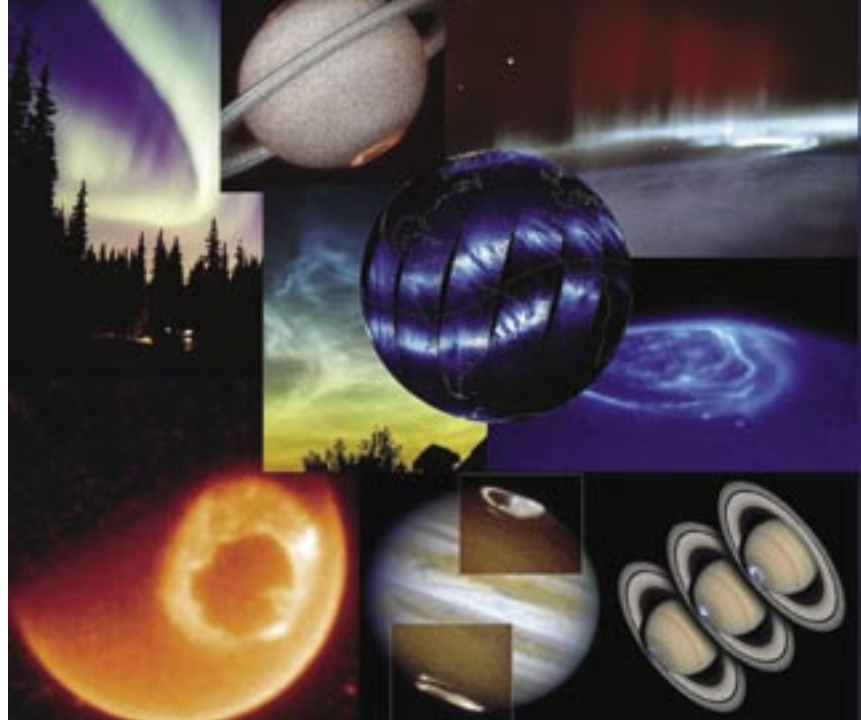
riaal "bij te tanken" vanuit de ionosfeer. Het BIRA heeft een model ontwikkeld dat de toestand van de plasmasfeer beschrijft in functie van de aardmagnetische activiteit. CLUSTER laat ons toe in detail de "plasmasferische slierten" te bestuderen: plasmasferisch plasma dat door een storm of substorm uit de plasmasfeer werd geslingerd.

De CLUSTER-metingen van de dichtheid in de plasmasfeer (met het WHISPER-experiment) gebruikt men om de dichtheidsgradiënt te bepalen. Het basisprincipe van CLUSTER is immers dat je de ruimtelijke variaties in drie dimensies pas kan bepalen als je beschikt over gelijktijdige metingen op vier posities die niet in eenzelfde vlak liggen. Intussen is ook een alternatieve berekeningstechniek ontwikkeld die gebruikt kan worden wanneer één satelliet niet operationeel is of te ver verwijderd is van de drie andere.

### Het ruimteweer en het BIRA

De interacties begrijpen tussen de heliosfeer en de magnetosfeer is onmisbaar voor het bepalen van het *ruimteweer*, de voorspelling van de impact van de toestand van de heliosfeer en de magnetosfeer op menselijke activiteiten.

Zo is het bij het bouwen van een satelliet belangrijk te weten welke dosis ioniserende straling de satelliet zal accumuleren gedurende zijn levensduur. Dit vereist modellen van de verdeling van de ioniserende straling rond de aarde, rekening houdend met de veranderlijkheid ervan met de zonnecyclus. Het BIRA heeft het SPENVIS-systeem ontwikkeld, dat daar bij uitstek voor geschikt is.



De impact van de heliosfeer op het menselijk lichaam is belangrijk bij ruimtereizen. Het BIRA heeft onlangs verschillende scenario's onderzocht voor een exploratie van Mars. Bij een dergelijke missie verblijven de astronauten gedurende lange tijd in de ruimte, maar ook op het oppervlak van de planeet worden ze blootgesteld aan de ioniserende straling uit de heliosfeer, omdat Mars geen beschermend intern magnetveld heeft ...

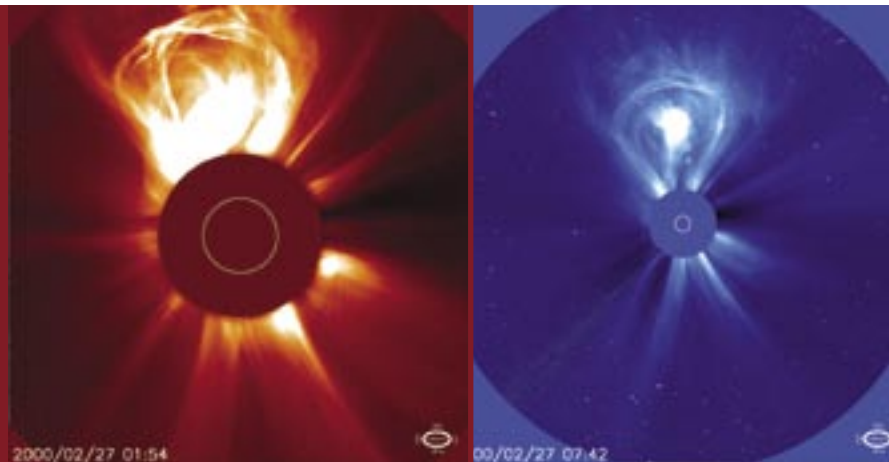
*Poollicht (aurora) op aarde en op andere planeten. © IHY2007, J. Rumburg*

Het BIRA onderzoekt de zon-aarde relaties door de interplanetaire ruimte en de onmiddellijke omgeving van de aarde te bestuderen. Gebruik makend van metingen door ruimte-sondes proberen de onderzoekers het gedrag van ruimteplasma's te begrijpen. Dat heeft zijn weerslag op de studie van het ruimteweer, zodat we beter de invloed van de heliosfeer op mens en technologie kunnen inschatten.

Johan De Keyser en Viviane Pierrard (BIRA)

Het gehele proces is zeer eruptief en hevig. Na enkele uren kan de wolk zich losgemaakt hebben van de zon en in de planeetaire ruimte haar weg verderzetten. Na enkele dagen kan zij de aarde bereiken. De wolk draagt een magnetveld met zich mee en interageert met de interplanetaire ruimte, de planeten en hun omgeving.

Hoewel de corona van de zon al vele duizenden jaren wordt waargenomen (tijdens totale eclipsen), werd het bestaan van CME's pas ontdekt in de *space age*. Het eerste bewijs van deze dynamische gebeurtenissen werd geleverd door waarnemingen met een coronograaf aan boord van het zevende *Orbiting Solar Observatory* (OSO 7) van 1971 tot 1973. Een coronograaf produceert een kunstmatige zonne-eclips door het beeld van de zon af te dekken met een verduisterende schijf. Vanaf de aarde kan met zo een coronograaf enkel het binnenste gedeelte van de corona gezien worden tegen de heldere hemel. Vanuit de ruimte is het zichtbaar deel van de corona echter veel groter en het kan zonder onderbreking waargenomen worden.



*De CME van 27 februari 2000 geobserveerd door de instrumenten van de satelliet SOHO. © SOHO, NASA/ESA*



*De zonnecorona bij een totale zonsverduistering. © KSB*