

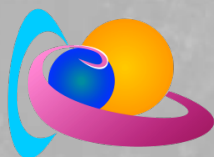
K.U.Leuven-Academisch Vormingsinstituut voor Leraren
Vliebergh-Senciecentrum
i.s.m. De Koninklijke Sterrenwacht van België en Solar-Terrestrial Centre of Excellence

PROBA2



Ruimteweer waarnemen met een Belgische satelliet

Documentatietekst voor leraren
Geschreven door
Elke D'Huys en Petra Vanlommel





In het najaar van 2009 werd PROBA2 gelanceerd, een satelliet waarbij het Solar Influences Data analysis Center (SIDC) van de Koninklijke Sterrenwacht van België in sterke mate betrokken is. Naar aanleiding hiervan stellen we een vakoverschrijdend project voor. Dat heeft als doel de leerlingen van de derde graad van het secundair onderwijs te laten kennismaken met de boeiende wereld van de ruimtevaart en de fysica van het Zon-Aarde systeem. Op die manier hopen we hun interesse voor wetenschapsstudies te wekken en hen een aantal onderzoeksvaardigheden aan te leren.

Ruimtevaart is een wetenschappelijke discipline die tot de verbeelding spreekt van vele leerlingen, ook al kunnen ze zich moeilijk een voorstelling maken van wat wetenschappelijk onderzoek op dit vlak effectief inhoudt. Ze beseffen vaak ook niet dat België een prominente rol speelt op het Europese ruimtevaarttoneel.

Het lessenpakket zal toegespitst worden op twee onderwerpen: de PROBA2 satelliet en het ruimteweer. Met behulp van deze concrete toepassingen worden verschillende thema's uit de leerplannen aardrijkskunde, fysica en wiskunde aangebracht. Vanzelfsprekend zal het project op een grotere interesse van de leerlingen kunnen rekenen, indien het in dezelfde periode bij verschillende vakken aan bod komt. Bovendien is dit lesmateriaal zeer geschikt om te werken aan vakoverschrijdende eindtermen. Een pluspunt is alvast het prachtig beeld- en filmmateriaal waarvan we gebruik zullen maken.

In wat volgt, wordt een inleiding gegeven op de twee grote thema's die we aan bod willen laten komen in het lessenpakket. We beginnen met het ruimteweer en de voorspellingen die er dagelijks van worden gemaakt. Daarna komt PROBA2 aan de beurt.

Maart 2010

'De mens is voortdurend in beweging en zijn invloed reikt steeds verder. De drang naar uitbreiding en aangeboren nieuwsgierigheid hebben ons verder gebracht dan onze ouders ooit hadden kunnen geloven. De wereld, mijn dorp, is niet meer toereikend. Passender zou zijn: de ruimte, mijn dorp.'

Inhoud

De Aarde in de ban van de Zon - een lessenkoffer	2
Inhoud	3
1 Ruimteweer	4
1.1 Zonnespectrum: van radiogolven naar gamma-straling	4
1.2 De veranderlijke Zon: van minimum naar maximum	5
1.3 Het zonnevlekkengetal	6
1.4 Het huidige minimum: de Zon is NIET dood!	8
1.4.1 Het minimum wiskundig	8
1.4.2 Maatstaven voor zonneactiviteit	8
1.4.3 Een vreemd minimum?	9
1.4.4 Daalt de temperatuur op Aarde tijdens een minimum?	9
1.4.5 Positieve gevolgen van een minimum	10
1.5 De dynamische Zon: drijver van het ruimteweer	10
1.5.1 Ruimteweer: link met de Aarde	10
1.5.2 Ruimteweer: de ingrediënten	11
2 De Zon observeren	13
2.1 SOHO	13
2.2 PROBA2 - een onderzoeksinstrument	13
3 Het ruimteweer voorspellen	15
3.1 Stap 1: Het weer op de Zon	15
3.2 Stap 2: De schakel tussen Zon en Aarde	20
3.3 Stap 3: De invloed op de Aarde	22
3.4 Stap 4: De ruimteweersvoorspelling opstellen	23
4 Het PROBA project	26
4.1 PROBA1	26
4.2 PROBA2	27
4.2.1 Het ontwerp van de PROBA2 satelliet	27
4.2.2 Communicatie met PROBA2	28
4.2.3 Lancering en baan van PROBA2	30
4.2.4 PROBA2 in een notendop	33
4.2.5 Technologiedemonstraties aan boord van PROBA2	34
4.2.6 De LYman Alpha Radiometer (LYRA)	36
4.2.7 De Sun Watcher using APS detectors and image Processing (SWAP)	38
4.2.8 The Dual Segmented Langmuir Probe (DSLPP)	40
4.3 SMOS	43
5 Verklarende woordenlijst – Lexicon	44

1 Ruimteweer

“Goedenavond, beste kijkers.” Weerman Frank Deboosere die op televisie het weerbericht presenteert, klinkt ons vertrouwd in de oren. Maar een ruimteweerbericht daarentegen, futuristisch en pure fictie? Toch niet, 24/24u wordt de Zon in de gaten gehouden en dagelijks worden voorspellingen en waarschuwingen van komende zonnestormen en uitbarstingen op de Zon verspreid.

De Zon is de hoofdrolspeler in het ruimteweer dat onze Aarde en haar technologische systemen beïnvloedt. Energetische zonnevlammen, massieve plasmawolken en stromen energetische geladen deeltjes bombarderen de Aarde. Die heeft gelukkig een tweevoudig beschermingsschild: de aardatmosfeer enerzijds en het aard-magnetisch veld anderzijds.

De Zon, een reusachtige plasmabool, is dus heel wat meer dan alleen maar dat rustige goudgele bolletje dat wij aan de hemel zien pronken.

De hemel, de sterren, de Zon, ze hebben al millennia lang iets mythisch. Sinds mensenheugenis heeft de kosmos de mens gefascineerd. Onze uitbreidingsdrang heeft ons ertoe gebracht om eind jaren 50 daadwerkelijk naar de ruimte te vliegen. Sputnik luidde de ingang van het ruimtetijdperk in. Samen met de ontwikkeling van de (ruimte-)technologie, groeide het besef dat onze Aarde in de invloedsfeer, d.i. de heliosfeer, van de Zon zweeft. Zonder de hulp van gesofisticeerde technologie konden tot voor kort we alleen de ‘naakte’ Zon met hier en daar zwarte vlekken waarnemen in zichtbaar licht. Waarnemingen van de Zon in zichtbaar licht dateren al van ver voor de tijd van Galileo Galilei. De zonnechromosfeer, net boven de fotosfeer, kunnen we van op de Aarde ook waarnemen door speciale filters voor de telescopen te plaatsen die enkel licht doorlaten van welbepaalde golflengten (H alpha). In de eerste helft van vorige eeuw werden per toeval ook radiosignalen opgevangen die werden uitgezonden door de Zon. Dit was het begin van de zonneradiospectroscopie. Ruimtemissies boden voor het eerst de mogelijkheid de Zon waar te nemen in het volledige elektromagnetische spectrum. Dankzij ruimtemissies werden de lagen bovenop de fotosfeer ook zichtbaar: de transitie laag en de corona. Onze ster, de Zon bleek een kluwen van magnetische velden die mee het gedrag van het elektrisch geladen plasma waaruit de Zon is opgebouwd, dirigeren. Allemaal heel mooi, maar de Zon bleek ook op een dynamische, gewelddadige en energetische manier te interageren met het magneetveld van de Aarde en de aardatmosfeer. De Zon kan immers een nefaste invloed hebben op satellieten, navigatie-systemen zoals GPS, radiocommunicatie en elektriciteitscentrales, en ook lange gas- en oliebuizen eroderen. Eerst waren er de sterren de Zon om te navigeren en nu verstoort de Zon GPS-metingen. Ruimteweercentra werden opgericht om gepast in te spelen op de acute gevaren vanuit de ruimte, veroorzaakt door het gedrag van de Zon.

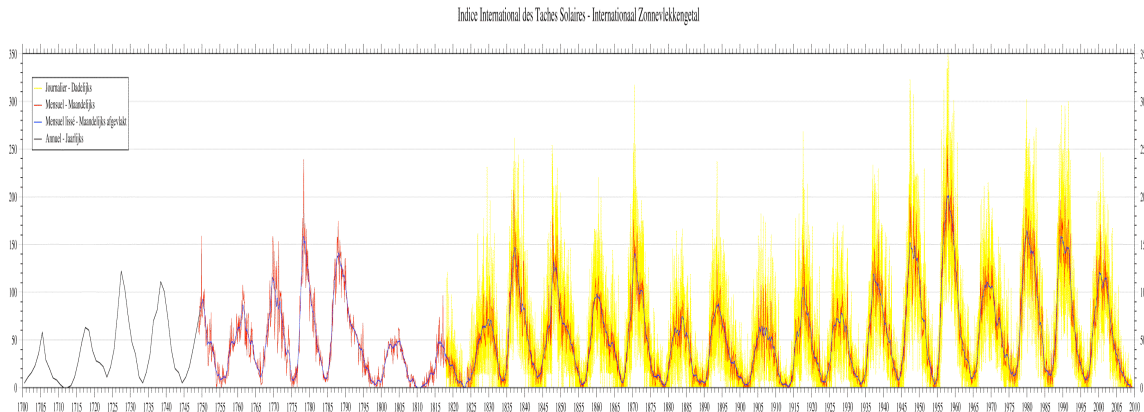
1.1 Zonnespectrum: van radiogolven naar gamma-straling

De Zon is een gigantische kachel die niet enkel licht of warmte uitzendt maar bovendien energie uitstraalt over het hele **elektromagnetische spectrum**: van radiogolven tot gamma-straling. Deze straling beweegt zich door de ruimte met de snelheid van, hoe kan het ook anders, licht: ongeveer 300000 km/s. Slechts een gedeelte van deze straling bereikt het aardoppervlak. De aardatmosfeer is een zonnewering die delen van de straling weerkaatst en absorbeert. Alleen radiogolven, het zichtbaar licht en een deel van het infrarood en het ultraviolet licht kunnen door de atmosfeer dringen tot bij het aardoppervlak.

In verschillende **golflengten** kan je steeds weer andere fenomenen en fysische processen ontdekken: zonnevlekken, actieve gebieden met mooie magnetische structuren, magnetische lussen die zich uitstrekken tot ver boven het zonneoppervlak, coronale gaten, protuberansen, ...

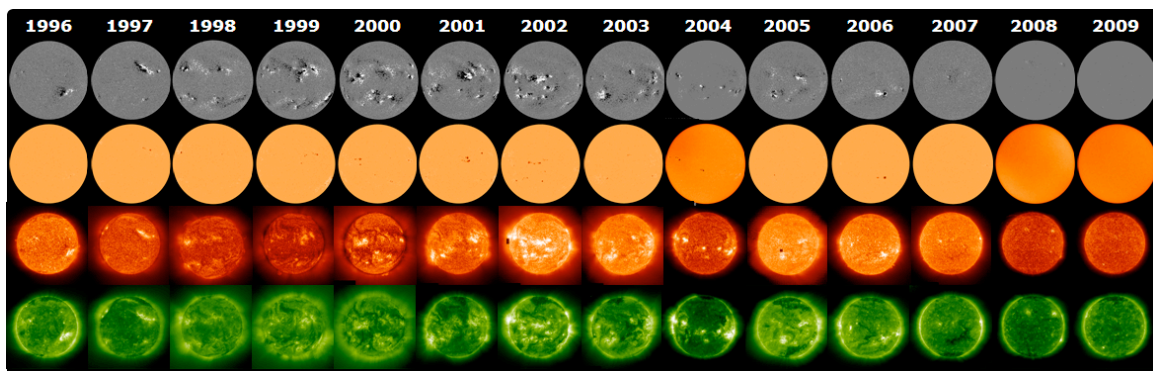
De **temperatuur** in de zonneatmosfeer verschilt van laag tot laag. Het is de temperatuur van de plasmadeeltjes die bepaalt bij welke golflengte ze energie uitstralen. Globaal gesproken komen hogere temperaturen overeen met kortere golflengten, maar ook de aard van het plasmadeeltje speelt een rol. Het rare is dat de temperatuur van het plasma stijgt wanneer we verder van de Zon weggaan! De verklaring hiervan is 1 van de uitdagingen van de zonnephysica.

1.2 De veranderlijke Zon: van minimum naar maximum



Figuur 1: De Zonnevlekkenindex vanaf 1700 tot nu: de zonneactiviteit varieert cyclisch.

De Zon is dus helemaal geen statisch, onveranderlijk hemellichaam zoals je wel eens zou kunnen denken. Net zoals we op Aarde de jaarlijks weerkerende seizoenen kennen, heeft de Zon haar eigen 22-jarige cyclus met 2 minima en 2 maxima. Sommigen zijn vertrouwd met de zogenaamde 11-jarige cyclus (zie Figuur 1), in feite bedoelen we hetzelfde. Tijdens een minimum, zoals in 1996, is de Zon kalm en minder actief. Er zijn dan minder structuren in de corona en zonnevlekken op het zonnepoppervlak te bespeuren. Tijdens een maximum, zoals in 2002, is het oppervlak van de Zon bezaaid met actieve gebieden die voortdurend kleine en grote uitbarstingen veroorzaken. Dit cyclische gedrag van de Zon is zichtbaar in de verschillende lagen van de Zon (zie Figuur 2).



Figuur 2: Het cyclische gedrag van de Zon is zichtbaar in de verschillende lagen van de Zon. De bovenste rij zijn magnetogrammen, die de magneetvelden van de Zon in kaart brengen. De tweede rij is de Zon in zichtbaar licht, de groene Zonnen zijn beelden in EUV 19,5 nm en geven de corona weer. De voorlaatste rij toont de chromosfeer in 30,4 nm.

De 22-jarige cyclus is duidelijk zichtbaar in het magnetisch veld van de Zon. Tijdens een

minimum is de Zon een grote magnetische dipool. Tijdens een maximum is er een wirwar van magnetische lussen en concentraties van magnetische gebieden over de ganse zonneschijf die de dipool-structuur helemaal overstemmen. Tijdens een zonnemaximum, wisselen de polen van de dipool-configuratie van polariteit: de magnetische zuidpool wordt de magnetische noordpool en vice versa. Dit gebeurt eens om de 11 jaar. Als we ons laten leiden door deze magnetische polariteit, spreken we over de 22-jarige activiteitscyclus van de Zon. Het is tenslotte ook het magnetisch veld dat de hoofdrolspeler is in de dynamische zonneprocessen.

De **fotosfeer** straalt vooral in **zichtbaar licht**, vandaar dat deze laag waarneembaar is van op de Aarde. Deze zichtbare laag wordt gekenmerkt door zonnevlekken. Het zonnevlekkengetal is een maat voor hoe erg de zonneschijf bevestigd is en is tevens een index voor de zonneactiviteit. Het mooie aan deze index is dat we deze kunnen bepalen door eenvoudige waarnemingen van op de Aarde zonder al te speciale apparatuur. Dit is de reden waarom deze index zo ver terug gaat in de tijd. Systematische waarnemingen van het zonnevlekkengetal begonnen reeds in het begin van de 17^{de} eeuw.

Als we de straling van de Zon over alle golflengten op een bepaald ogenblik optellen, krijgen we de zogenaamde zonneconstante of zonne-irradiantie. We kunnen deze berekenen eens we de luminositeit van de Zon kennen. Door de zonneconstante te meten vanuit de ruimte, heeft men vastgesteld dat deze zonneconstante helemaal niet constant is maar integendeel varieert in een cyclus van 11 jaar. Als we dit koppelen aan het magnetische veld van de Zon, spreken we hier eveneens van een 22-jarige cyclus. Deze veranderlijkheid komt vooral tot uiting in het deel van het spectrum met korte golflengten (EUV en X-stralen), wat overeenkomt met de straling van de hete corona.

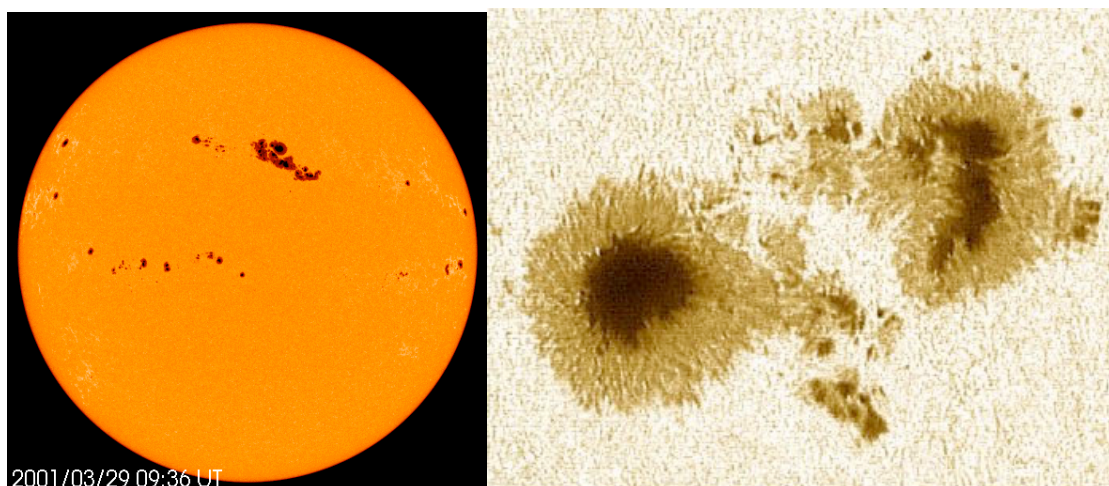
De oranje/rode zonnen (30.4 nm) laten de transitie laag zien die zich net onder de **corona** bevindt. De groene zonnen (19.5 nm) laten de corona in al haar pracht en glorie zien. De aardatmosfeer werkt als een zonnewering voor o.a. deze EUV-straling, vandaar dat deze pas aan het *licht* is gekomen wanneer men ruimtewaarnemingen begon te doen.

Variabele cyclus?

Maar pas op! De Zon heeft een verborgen agenda en kan misschien wel eens besluiten om de 11-jarige cyclus overboord te gooien zoals ze in het verleden al bewezen heeft. Zo werden tijdens het Maunder Minimum (1645 - 1715) zo goed als geen zonnevlekken waargenomen. Nu is er heel wat heisa ontstaan omdat het huidige minimum 'lang' heeft geduurd. Maar cyclus 24 heeft zich al aangekondigd, weliswaar traag.

1.3 Het zonnevlekkengetal

Zonnevlekken liggen aan de oorsprong van het ruimteweerfenomeen 'zonnevlammen'. Een zonnevlam is een plotse, sterke toename van de zonnestraling. Je kan een zonnevlam letterlijk zien als een locale, plotse lichtflits. De flits is gelokaliseerd op de plaats van een zonnevlek.



Figuur 3: Als we naar de Zon kijken in zichtbaar licht, kunnen we zwarte vlekken ontdekken op de zonneschijf. Dit zijn de zogenaamde zonnevlekken. Dikwijls komen ze in groepen voor. We onderscheiden in de grotere vlekken de umbra (zeer donker) en de penumbra (minder donker). Een vlek heeft een bepaalde magnetische polariteit: het magnetisch veld prikt in of uit het zonneoppervlak. Magnetische lussen, dit zijn structuren in de corona, verbinden 2 vlekken met tegengestelde polariteit. Let op, in deze beelden van de fotosfeer zijn de magnetische lussen niet zichtbaar. Deze onzichtbare krachtevelden reiken tot in de corona en kan je zichtbaar maken door in het EUV naar de Zon te kijken.

We geven enkele typische kenmerken van een zonnevlek (Figuur 3):

- Donker gebied in de fotosfeer: een bundeling van magnetische veldlijnen die door het zonneoppervlak priemen. De temperatuur is een 2000 K lager is dan de rest van de fotosfeer,
- Zijn opgebouwd uit een umbra of centrale schaduw en een penumbra of halfschaduw. De penumbra is afwezig bij kleinere vlekken (diameter $< 2\,500\text{ km}$),
- De centrale schaduw heeft een lichtsterkte van slecht 5 tot 30% van de intensiteit van de fotosfeer, de halfschaduw heeft een lichtsterkte van 50 tot 70% van deze van de fotosfeer.
- Kunnen enkele uren tot enkele dagen aanwezig zijn,
- Komen dikwijls voor in groepen: zonnevlekgroepen,
- Bevinden zich in 2 banden (noordelijke en zuidelijke hemisfeer) tussen de 5° en 40° breedtegraad,
- Groepen zijn 'uitgesmeerd' over de oost-west richting (over 20 lengtegraden). Ze kunnen tot 50 vlekken bevatten.

Rudolf Wolf, een Zwitserse astronoom, voerde het Wolfgetal in, gedefinieerd als $R = 10\,G + S$ waarbij G het aantal zonnevlekkengroepen en S het total aantal vlekken voorstelt. De combinatie van zonnevlekken en hun overeenkomstige groepen compenseert de variaties in kleine zonnevlekken. Wolf liet zich voor de keuze van 10 G inspireren door de intentie om R zo ver mogelijk terug in de tijd te bepalen. Wolf koos ervoor om kortlevende groepen bestaande uit slechts één kleine vlek en groepen van kleine vlekken die enkel waargenomen konden worden bij een zeer goede zichtbaarheid, niet in zijn dagelijkse observaties op te nemen. Dit vereenvoudigde de vergelijking met vroegere waarnemingen. De Wolf-rationaliteit stond garant voor het gelijkschalen van observaties in het verleden en zorgde ervoor dat de groep-telling hetzelfde gewicht kreeg dan de vlek-telling.

Wolf moest oude en nieuwe archieven in overeenstemming brengen, zowel met zijn eigen gegevens als onderling. Hiervoor introduceerde hij de reductiefactor K , die specifiek is voor iedere waarnemer: $R = K(10 G + S)$. De opvolger van Wolf, zijn naam was Wolfer (!), begon aan de uitbouw van een heel netwerk van waarnemers om zo de veranderlijke zichtbaarheid op bepaalde locaties op te vangen en de continuïteit in de dagelijkse observaties te garanderen. Er werd bepaald dat, wanneer een waarde van $K=1.0$ voor Wolfs waarnemingen werd aangenomen, een coëfficiënt voor $K=0.6$ voor Wolfers waarnemingen de indices bij benadering op dezelfde schaal zou plaatsen, om zo de gewenste continuïteit te behouden. Vandaag heeft elke waarnemer zijn persoonlijke K .

Het Wolfgetal kwantificeert de zonneactiviteit. Deze index legt de link tussen zonneactiviteit en de concentratie van magnetische velden waaruit zonnevlekken ontstaan. Zonder ook maar iets te weten over de link tussen magnetische structuren en zonnevlekken, heeft het giswerk van Wolf (10G) een index opgeleverd die verbazend goed werkt! Wanneer de concentratie van de magnetische velden toeneemt, dit is tijdens de groeifase van een zonnevlek, is de kans op zonnevlammen groter dan tijdens de fase waarin het magneetveld verdwijnt. Een zonnevlek degradeert uiteindelijk tot een 'plage'. In die fase is er geen bijdrage meer tot R . Het Wolfgetal is in feite een maat voor sterke, nieuwe magnetische velden.

Sinds 1981 is het werelddatacentrum, World Data Center (WDC) voor de zonnevlekkenindex gehuisvest in Ukkel aan de Koninklijke Sterrenwacht van België. Het WDC berekent o.a. het dagelijkse Internationale Zonnevlekkengetal R_i van een bepaalde maand op basis van alle verzamelde Wolfgetallen die vermenigvuldigd worden met de schaalfactor K geassocieerd aan die bepaalde waarnemer. Men maakt een gewogen gemiddelde waarbij tijdens het proces abnormale waarden worden uitgefilterd. Het is zelfs mogelijk dat alle waarden die een station die maand heeft doorgestuurd verworpen worden als blijkt dat de kwaliteit ondermaats is.

De dagelijkse R_i is een geheel getal tussen 0 en pakweg 300 (zie Figuur 4). De bovengrens is in theorie onbegrensd. Lage/hoge waarden geven aan dat de kans op zonnevlammen klein/groot is. Er is in feite geen verschil in termen van zonneactiviteit tussen lage getallen, 0, 1, 2, ...4. Daarom zou het gepast zijn om R_i in groepen of intervallen ('bins', bijvoorbeeld van grootte 5) in te delen. De gele curve in Figuur 4 zou dan niet meer alle waarden van de Y-as aandoen. Een parameter ingedeeld in bins wordt typisch weergegeven door een histogram. Tot nu toe doet het WDC dit niet, ondanks de hevige discussies die oplaaide in 2008-2009 waarbij de inzet het verschil was tussen $R_i=0$ en 1. Je mag niet vergeten dat deze index eigenlijk een maat is voor de kans op zonnevlammen en dat zowel $R_i=0$ als $R_i=1$ gewoon klein is.

1.4 Het huidige minimum: de Zon is NIET dood!

1.4.1 Het minimum wiskundig

Het minimum in de zonnevlekkencyclus is de maand met het kleinste afgevlakt maandelijks gemiddelde van het zonnevlekkengetal. We vlakken af over 13 maanden waarbij we middelen over 6 maanden voor en 6 maanden na de betreffende maand. Je kan het minimum dus pas achteraf bepalen!

1.4.2 Maatstaven voor zonneactiviteit

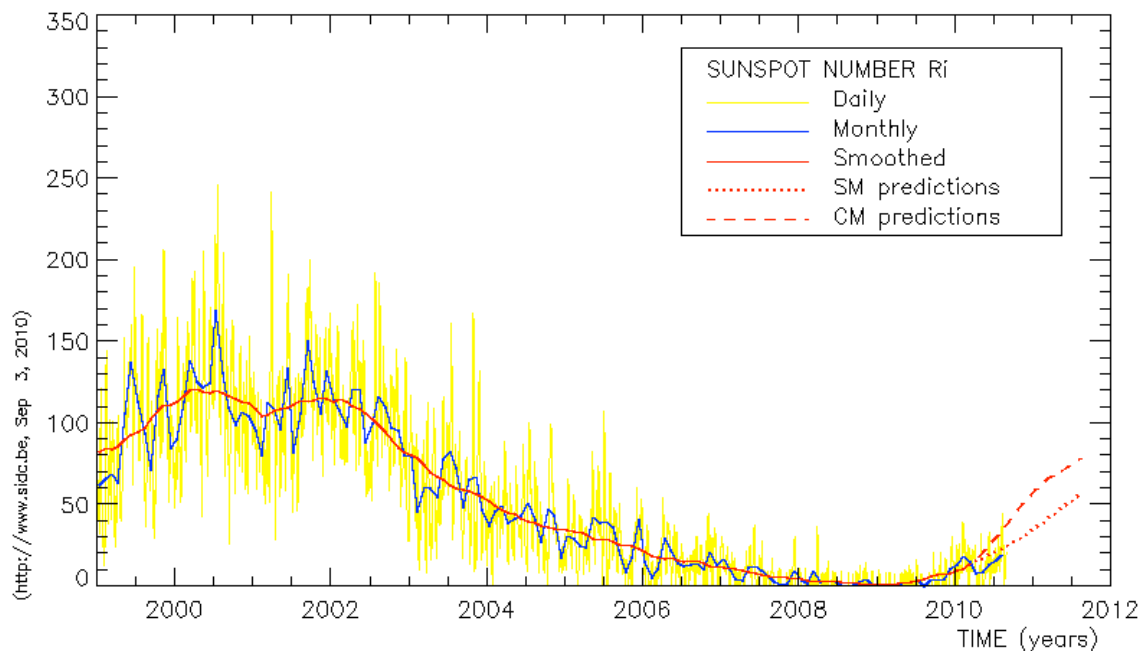
We sommen een paar indices voor de zonneactiviteit op:

- Het zonnevlekkengetal: d.i. een maat voor hoe erg de zonneschijf bevlakt is en is tevens de oudste en meest bekende index.
- De TSI: Total Solar Irradiance, de som van alle zonnestraling.
- De 10cm flux: de som van alle zonnestraling met een golflengte van 10.7 cm.

1.4.3 Een vreemd minimum?

100 jaar geleden, in 1913, was de zon ook verzeild in een diep minimum waarbij de maandelijkse zonnevlekkenindex tot 2 maal toe nul was. De Zon is toen ook uit haar dipje geraakt.

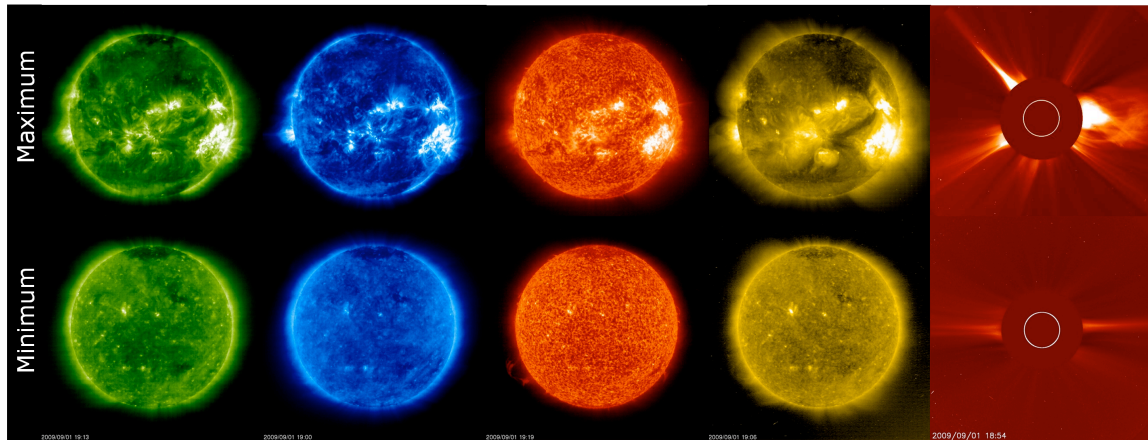
Het huidige minimum is erg lang. Niemand had dit verwacht. In 2008 was de dagelijkse zonnevlekkenindex 268 keer nul, in 2009 2 keer. De Zon heeft de draad ondertussen weer opgepikt: op 23 september 2009 zagen we 2 zonnevlekken van de volgende cyclus, nummer 24, na een ononderbroken vlekvrrije periode sinds 31 juli 2009. Sinds 2008 al, zien we sporadisch zonnevlekken van cyclus 24 opduiken. Het maandelijks gemiddelde zonnevlekkengetal zit terug in de lift zoals je in Figuur 4 kan zien.



Figuur 4: Deze grafiek toont het verloop van de dagelijkse, het maandelijks gemiddelde van en de afgevlakte zonnevlekkenindex. De rode afgevlakte curve geeft het 'klimaat' van de zonneactiviteit weer omdat de dagelijkse opspingen en fluctuaties uitgemiddeld zijn. Voor het maandelijks getal (blauwe curve) middelen we over het aantal dagen van de betreffende maand. Het aantal dagen per maand is variabel. Wiskundig en statistisch is het daarom minder correct om de maandelijks gemiddelden met elkaar te vergelijken. Toch geven we deze maandelijks getallen omdat we vertrouwd zijn met de opdeling in maanden. In de meteorologie worden waarden ook dikwijls per maand gegeven.

1.4.4 Daalt de temperatuur op Aarde tijdens een minimum?

De Zon is naast een enorme gloeilamp ook een radiator. Zet de radiator af en de temperatuur zal dalen. 's Nachts is het inderdaad kouder. Maar de variatie van bv. de infrarode straling (zie Figuur 5 voor de variatie in EUV en zichtbaar licht uitgestraald door het plasma in de corona) over de 11-jarige cyclus is heel klein en de invloed valt in het niets in vergelijking met de huidige klimaatschommelingen. Het minimum dat we net gehad hebben en de gepaard gaande daling van de totale zonnestraling is te klein om de temperatuur op aarde significant te doen dalen.



Figuur 5 We zien de Zon in 4 golflengtes: $195\text{\AA}$, $171\text{\AA}$, $304\text{\AA}$ en $284\text{\AA}$ op een bepaald moment tijdens het maximum en tijdens het minimum. In de beelden genomen tijdens het maximum zien we lichte structuren: dit zijn actieve gebieden. Deze stralen intenser in die bepaalde golflengte. Een actief gebied wordt gevormd door een bundeling van magnetische lussen. In de 4 figuren komt de positie van het actieve gebied overeen. Elke golflengte komt overeen met een laag van de zonneatmosfeer. Zo een magnetische structuur zie je op het zonneoppervlak als een zonnevlek (hier niet getoond) en in de corona als een bundel van lussen. De rechtse afbeelding werd gemaakt door een coronograaf. Dit is een instrument dat een plaatje voor de Zon houdt zodat de ruimte rondom de Zon zichtbaar wordt. Een coronograaf bootst eigenlijk een eclips na: het instrument schermt het rechtstreekse zichtbare licht van de Zon af en kan zo de corona die veel minder straalt (omdat deze zoveel ijler is) toch waarnemen. De lichte pieken zijn streamers waar de magnetische lussen (gesloten veldlijnen) tot ver in de corona reiken. Het plasma zit gevangen in deze magnetische lussen.

1.4.5 Positieve gevolgen van een minimum

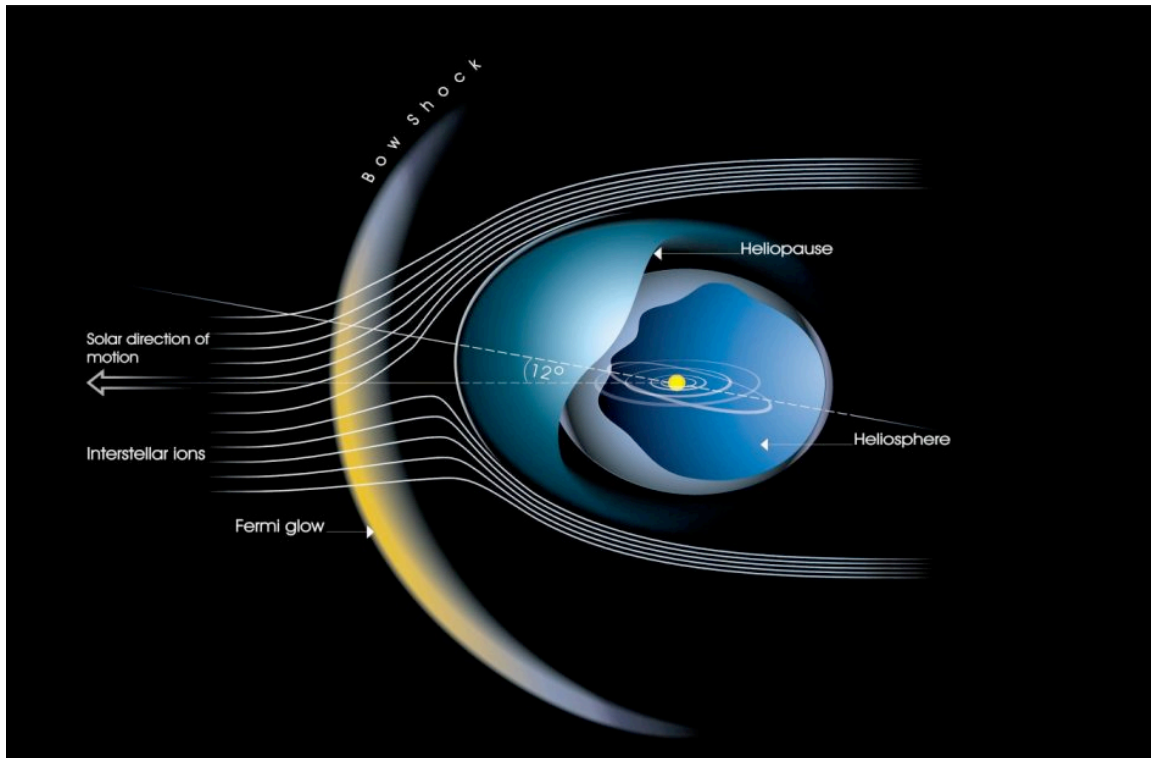
Het extreme zonneminimum betekent goed nieuws voor satellieten in een baan rond de aarde. De aardatmosfeer is daardoor minder dicht op grote hoogten. Hierdoor botsen er minder lucht moleculen tegen de satelliet aan en ondervindt die minder sleepkracht. Een lage zonneactiviteit betekent ook minder ruis in de satellietwaarnemingen.

1.5 De dynamische Zon: drijver van het ruimteweer

1.5.1 Ruimteweer: link met de Aarde

De term ruimteweer is ontstaan naar analogie met het gewone weer op Aarde. Alleen gaat 'ruimteweer' niet over de hoeveelheid zonneschijn, ijzel en neerslag, maar over het gedrag van de Zon. De invloed van de Zon is merkbaar doorheen het hele zonnestelsel. Men noemt deze invloedsszone de **heliosfeer** (zie Figuur 6). We zijn in het bijzonder geïnteresseerd in de invloed van de zonneactiviteit op de omgeving van de Aarde. Verstoringen in het ruimteweer kunnen de prestaties en de betrouwbaarheid van technologische systemen (in de ruimte en op Aarde) beperken, en zelfs het menselijke leven en gezondheid beïnvloeden. Geavanceerde technologieën zijn wel degelijk gevoelig voor storingen veroorzaakt door ruimteweerfenomenen. Het aantal zonnevlekken en hun magnetische configuratie, de aanwezigheid van protuberansen, de structuur van de corona, de magnetische zonnwind, dit zijn een paar van de ingrediënten waarmee gekookt wordt. De toestand van de ruimte wordt zo goed mogelijk gemodelleerd om uiteindelijk

te komen tot een adequate voorspelling van de kans op zonnevlammen, kans op protonenstormen, de 10-cm flux als maat voor de zonneactiviteit en eventuele verstoringen van het aardmagnetisch veld.

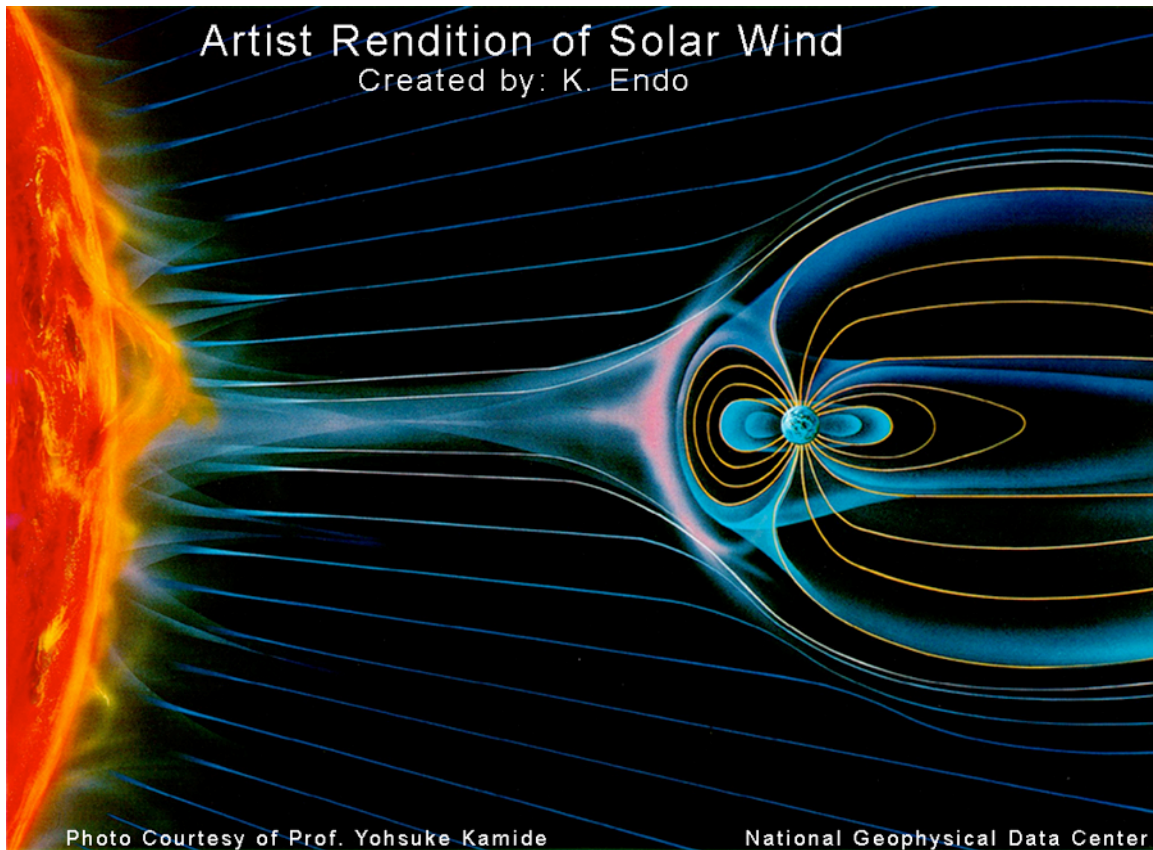


Figuur 6: De heliosfeer is een magnetische bubbel rond de Zon en duidt aan tot waar de invloed van de Zon reikt.

1.5.2 Ruimteweer: de ingrediënten

Stralingsstormen tijdens een zonnevlam kunnen communicatie- en navigatiesystemen danig in de war sturen. Zulke systemen maken gebruik van de ionosfeer die tijdens een storm door de verhoogde X-stralen verstoord wordt. Tijdens zonnevlammen worden eveneens radiogolven geproduceerd die als extra bron van ruis een signaal kunnen verstoren. De verhoogde ultraviolette zonnestraling verhit ook de bovenste lagen van de aardatmosfeer waardoor deze uitzet. Satellieten en ruimtetuigen waarvan de baan door zo een gebied gaat, ondervinden een extra sleepkracht, komen in een lagere baan terecht en kunnen opbranden.

De energetische **protonen** bombarderen satellieten en kunnen defecten veroorzaken aan de elektronica en de zonnepanelen. Astronauten moeten ook opletten tijdens ruimtewandelingen en ook in het ruimtestation voor ziek makende of zelfs dodelijke stralingsdosissen. Tijdens vluchten over de polen, kunnen protonen ook inslaan op vliegtuigen.



Figuur 7: In de superhete corona wordt de bewegingsenergie van elektronen en ionen zo hoog dat ze uit de aantrekkingskracht van de Zon ontsnappen. De ijle plasmastroom die zo ontstaat noemen we zonnwind.

De Zon verliest per seconde ongeveer een miljoen ton materie in de vorm van **zonnwind** (zie Figuur 7). Deze verspreidt zich door de interplanetaire ruimte met een gemiddelde snelheid van 450 km/s of 160 000 km/u. Deze zonnwind, een ruimteplasma, vormt de fysische verbinding tussen de Zon en de Aarde en waait continu over de Aarde. De zonnwind is bovendien magnetisch: de Aarde zit letterlijk in de magnetische greep van de Zon.

Af en toe spuwt de Zon magnetische plasmawolken uit. Een dergelijke wolk is te vergelijken met een verpletterende tsunami die bovenop de zonnwind in de achtergrond raast. Wanneer het magneetveld van de Zon dat meegesleurd wordt door een plasmawolk koppelt met het magneetveld van de Aarde, ontstaat er een **geomagnetische storm** waarmee o.a. het wonderbaarlijk poollicht gepaard gaat. Maar het verstoorde magneetveld van de Aarde kan elektrische stromen opwekken in o.a. elektriciteitsbedrading en pijpleidingen. GPS-nauwkeurigheden zijn eveneens gevoelig voor geomagnetische stormen. Oliemaatschappijen monitoren via magnetometers continu het boorpad wanneer ze op zoek gaan naar nieuwe oliereservoirs. Deze metingen kunnen verstoord worden.

Straling, protonen en zonnwind spelen zich af op verschillende tijdsschalen. Licht bereikt de Aarde na **8 minuten**, protonenstormen hebben gemiddeld een klein **uurtje** nodig terwijl de zonnwind er **3 dagen** over doet om de Aarde te bereiken.

2 De Zon observeren

Van alle straling die de Zon uitzendt, kunnen we hier op Aarde, alleen het zichtbaar stuk en de radiogolven waarnemen. De aardatmosfeer houdt alle andere straling tegen en beschermt ons zo tegen schadelijke röntgenstralen afkomstig van de Zon. Willen we de Zon observeren in andere golflengten moeten we dus naar de ruimte. Zo kunnen we naast de fotosfeer die voornamelijk straalt in zichtbaar licht, ook de hete corona waarnemen.

2.1 SOHO

Als we door de bril van de telescoop EIT, de ‘Extreme Ultraviolet Light Imager Telescope’ aan boord van de satelliet SOHO kijken, zien we dat de Zon en haar corona, die zich boven het fotosferische oppervlak uitstrekt, een kluwen van magnetische veldlijnen zijn die doorheen het zonneoppervlak prikken en gigantische lussen vormen. In die lussen zit plasma gevangen. Het is dankzij dit opgesloten plasma dat extreem ultraviolet licht uitzendt, dat de onzichtbare magnetische veldlijnen zichtbaar worden voor EIT. Op sommige plaatsen zie je een verhoogde concentratie van het magneetveld, dit zijn actieve gebieden. De zonnevlekken die hieraan gekoppeld zijn, zie je letterlijk als donkere vlekken op het oppervlak van de Zon. Soms kan je zelfs met het blote oog zonnevlekken waarnemen. Kijk dan wel met een eclipsbril! De kans is op dit moment echter kleiner omdat we in een zonneminimum zitten. De magneet velden zijn gebundeld in zulke tijdelijke donkere vlekken: ze komen eruit om weer te verdwijnen in een andere vlek van de zonnevlekgroep. Ze vormen zo lussen.

EIT neemt een zonnevlam waar in 19.5 nm: je ziet stukken van de Zon kortstondig oplichten. Die straling heeft de snelheid van het licht en bereikt de Aarde in 8 minuten. Er zijn ook satellieten die de X-straling van de Zon meten, zoals GOES, Geostationary Operational Environmental Satellite. GOES observeert in de eerste plaats de Aarde, het is een weersatelliet. Er is ook een monitor voor röntgenstralen aan boord die het geïntegreerde röntgenlicht van zonnevlammen meet. We rangschikken zonnevlammen volgens hun intensiteit in X-straling. Zo hebben we B, C, M en X-vlammen. X-vlammen zijn de sterkste en hebben de meeste energie.

2.2 PROBA2 - een onderzoeksinstrument

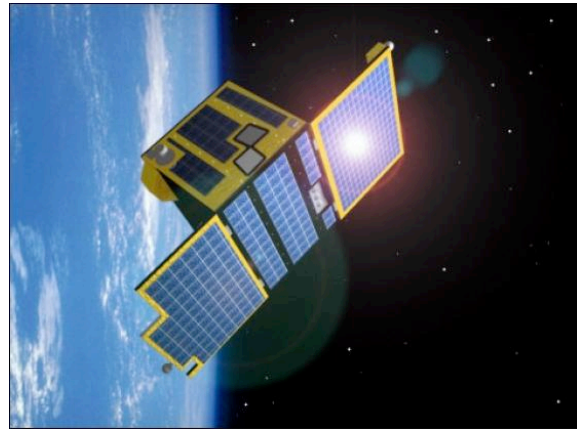
We besteden in dit project speciale aandacht aan de satelliet PROBA2, de tweede satelliet van het Project for On-Board Autonomy. We geven hier enkel een kort persbericht mee. Dit bericht werd door de Koninklijke Sterrenwacht verspreid naar aanleiding van het vervoer van de afgewerkte satelliet naar het lanceerplatform in Rusland. In een later hoofdstuk komt de PROBA2 satelliet in meer detail aan bod.

België op weg naar de ruimte

Bestemming: baan rond de Aarde

Observatieobject: de Zon

De spanning stijgt aan het SIDC, Solar Influences Data analysis Center. Twee instrumenten aan boord van de ESA-satelliet PROBA2 zijn in handen van het Solar-Terrestrial Center of Excellence, STCE. De satelliet zal met een Sojoez-raket naar de ruimte geschoten worden in november 2009. Vooraleer we zo ver zijn, moet de ganse satelliet minutieus ingepakt worden voor de verscheping in juni 2009. Eens in Rusland zullen de bouwers van de satelliet, Verhaert Space NV alles in elkaar passen en de laatste testen uitvoeren.



Wetenschappers en industrie hebben hun krachten gebundeld. Het resultaat is PROBA2, Project for On-Board Autonomy. Het is een pareltje van Belgische makelij en van innoverende ruimtetechnologie. Het toestel is compact en de elektronica heeft slechts weinig energie nodig om te functioneren. De data worden aan boord verwerkt en zeer sterk gecomprimeerd zodat toch zeer veel gegevens kunnen doorgeseind worden naar de Aarde via de beperkte telemetrie. Bovendien voert de satelliet autonoom een aantal operaties uit, zoals bv 'wegkijken' in het geval van een schadelijke zonnestorm.

De SWAP telescoop filmt de Zon in het extreem ultraviolet. Onzichtbare zonne-uitbarstingen kunnen zo toch worden vastgelegd op de gevoelige plaat. Wetenschappers van het STCE hebben bepaald welke golflengte in het EUV het meest geschikt was en een optimale ruimtelijke nauwkeurigheid en tijdsresolutie voor de beelden uitgekozen. Uiteindelijk werd het 17.5 nanometer, 1 beeld/minuut van de zonneschijf plus een stuk van de ruimte rondom. Dit instrument is ook in staat om een plasmawolk te volgen die van de Zon weg wordt gekatapulteerd.

De telescoop met de klinkende naam LYRA is een UV-stralingsmeter waarvan een aantal detectoren gemaakt zijn van diamant. De Zon is het helderst in zichtbaar licht: de Zon straalt vooral in deze golflengten. Maar dankzij de diamant technologie kan de detector toch het UV waarnemen ondanks het overheersende zichtbaar licht. Daarnaast zorgt de diamant ook voor de nodige bescherming tegen schadelijke ruimtestraling.

Naast de ondersteuning van het puur wetenschappelijk onderzoek, helpen de 2 telescopen tevens de ruimteweersvoorspellers de Zon op elk ogenblik in de gaten te houden. Ruimteweer is een boeiende wetenschappelijke discipline, tegelijkertijd is het ruimteweer echter ook een bedreiging voor o.a. satellieten. Radiocommunicatie en navigatie, o.a. GPS-systemen worden sterk beïnvloed door het ruimteweer. Voorts willen allerlei bedrijven, niet-commerciële instellingen, radioamateurs, luchtvaartmaatschappijen, satellietoperatoren, enz. op de hoogte gehouden worden van het ruimteweer. PROBA2, zelf onderhevig aan het ruimteweer, zal instaan voor de veiligheid en bescherming tegen het ruimteweer. PROBA2 heeft alvast het voordeel dat hij voor een deel beschermd wordt door het magnetisch veld van de Aarde en door zijn automatische 'wegkijk'-truuk tijdens zonnestormen.

Het SIDC maakt deel uit van het STCE, een Belgisch wetenschappelijk expertisecentrum dat de relatie Zon-Aarde bestudeert. Het instituut is een koploper met wereldfaam op het terrein van ruimteweeronderzoek en diensten.

3 Het ruimteweer voorspellen

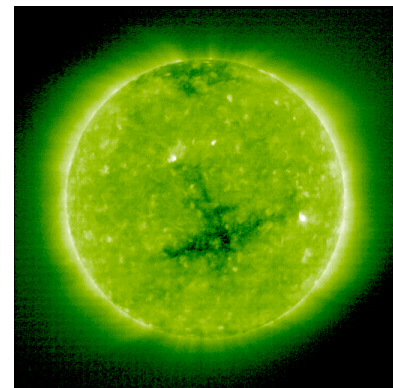
PROBA2 is een ruimteweersatelliet. Dat houdt in dat de gegevens die we onder andere van de instrumenten LYRA en SWAP ontvangen, gebruikt zullen worden om voorspellingen te maken van het ruimteweer. De Koninklijke Sterrenwacht van België maakt elke dag zo een voorspelling en de invloed van het ruimteweer op Aarde. Deze voorspelling is geldig voor de komende drie dagen. Een team van voorspellers wisselt elkaar wekelijks af. De voorspelling wordt via email verstuurd naar geïnteresseerde gebruikers en op de website van het SIDC geplaatst. (<http://www.sidc.be/>)

Het opstellen van een ruimeweervoorspelling gebeurt in 4 stappen. Eerst kijkt de voorspeller na wat zich nu en de voorbije dagen heeft afgespeeld op de Zon. Dan gaat hij/zij na wat de huidige toestand is van de interplanetaire ruimte en van de zonnwind. Vervolgens schat hij/zij in wat de effecten op Aarde zullen zijn. Tenslotte vat de voorspeller dit alles samen in een ruimteweerbericht. De voorspellers van het SIDC combineren informatie van heel wat verschillende satellieten, instrumenten en instituten om zich een idee te vormen van de ruimteweersituatie. Om het vinden van alle gegevens voor hen zo eenvoudig mogelijk te maken, werd een webpagina gemaakt als startpunt: <http://sidc.oma.be/LatestSWData/LatestSWData.php>

3.1 Stap 1: Het weer op de Zon

Enkele van de belangrijkste elementen die het weer op de Zon bepalen zijn zonnevlekken en actieve gebieden, coronale gaten, coronale massa-ejecties (CME) en zonnevlammen. Om zich een eerste idee te vormen van de zonneactiviteit op het moment, kijkt de voorspeller om te beginnen naar de Zon zelf: de meeste recente zonnebeelden van SWAP of EIT geven al een goede indicatie. Zijn er coronale gaten of actieve gebieden te zien op de zonneschijf? Deze locaties moeten aandachtiger bekeken worden door de voorspeller.

Coronale gaten zijn te herkennen als donkere, onregelmatige vlekken op de zonneschijf (Figuur 8). Aan de noord- en de zuidpool van de Zon is altijd een coronaal gat te zien. Deze polaire gaten kunnen uitbreiden naar de evenaar toe. Ook kunnen geïsoleerde coronale gaten gevormd worden op de zonneschijf, vooral tijdens een zonnemaximum. Een coronaal gat is een koeler en ijler gebied waar de magnetische veldlijnen open zijn en koppelen aan de zonnwind. Daarom zijn deze gaten een bron van snelle zonnwind. De voorspeller kijkt vooral naar (grote) coronale gaten aan de westkant van de Zon. (Dit is de rechterkant van de zonneschijf.) Vanaf het moment waarop een coronaal gat op de zonnebeelden de centrale meridiaan gepasseerd is, kan het een effect hebben op het geomagnetisme op Aarde. De aanwezigheid van een coronaal gat zal ook een daling veroorzaken in de 10 cm flux, de radio-emissie van de Zon bij een golflengte van 10,7 cm.

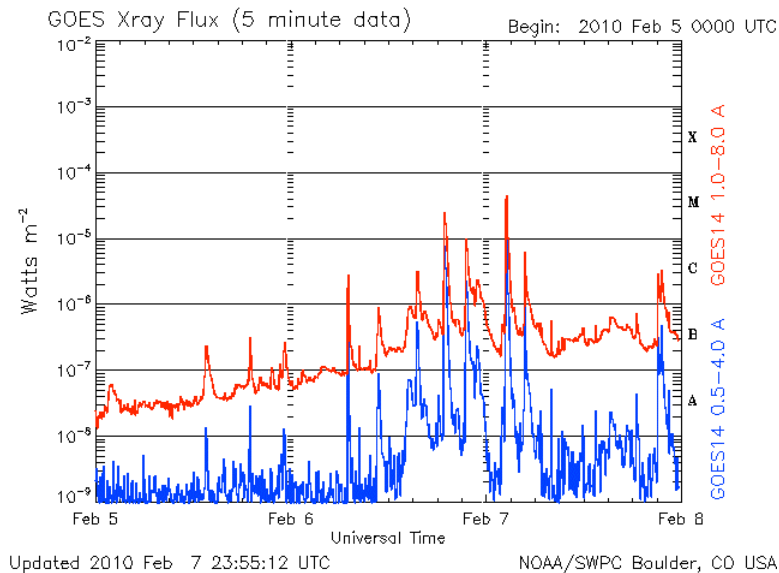


Figuur 8: Een groot coronaal gat domineert dit EIT zonnebeeld, genomen op 30 september 2008.

Een film van de laatste zonnebeelden kan een **zonnevlam** onthullen. We zien dan een verzadiging van het licht komende van een actief gebied. Een lijst van recent waargenomen zonnevlammen is ook via de webpagina te vinden onder ‘Solar Events (SEC)’ en ‘SolarSoft Events’.

Natuurlijk wil een voorspeller niet alleen weten wanneer er zich een zonnevlam heeft voorgedaan, maar ook inschatten hoe groot de kans is dat zich (nog) een zal voordoen in de komende dagen. Het verstrengelde en verrokken magneetveld boven zonnevlekken is de plaats waar zonnevlammen voorkomen. Verschillende keren per dag worden er aan de Koninklijke Sterrenwacht tekeningen gemaakt van de zonnevlekken, waarop ook het zonnevlekgetal wordt genoteerd. Deze actieve gebieden zijn de locaties waarop de voorspeller zich focust.

(http://sidc.oma.be/images/last_ORBdrawing.jpg)



Figuur 9: Grafiek van de flux van X-stralen, gemeten door de GOES satelliet op 7 februari 2010. De grafiek toont een aantal M-type zonnevlammen geproduceerd door NOAA 1045.

Actieve gebieden worden op basis van hun magnetische complexiteit ingedeeld in de zogenaamde McIntosh classificatie. Des te complexer, des te groter de kans op activiteit en op zonnevlammen. We laten ons hiervoor leiden door magnetogrammen (bv. Van SOHO MDI) en kijken hoe sterk zwarte en witte gebieden in elkaar verstrengd zijn.

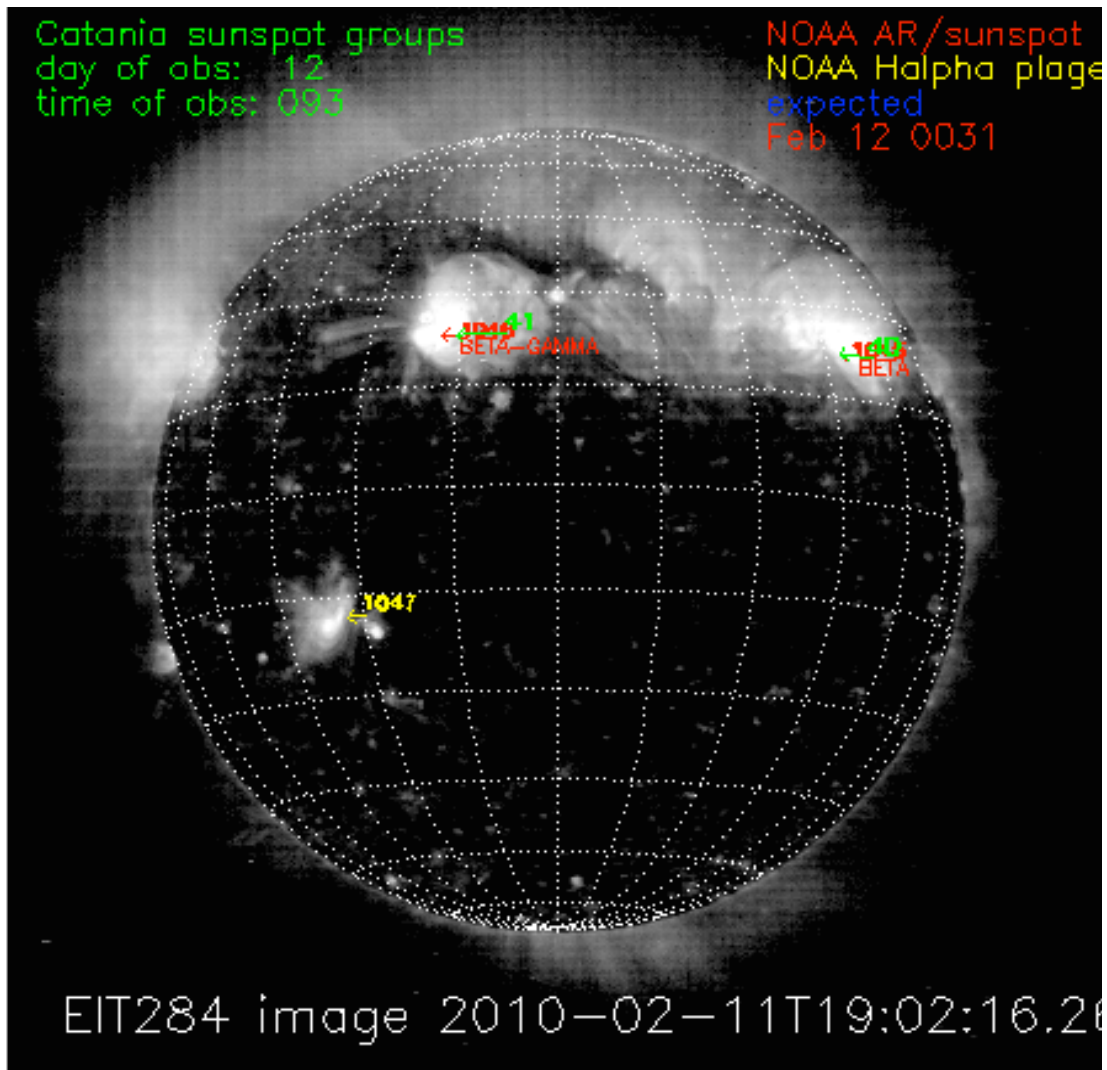
Daarenboven, om na te gaan welk actief gebied ook daadwerkelijk actief is op dit moment, kijken we naar de recente zonnevlammen in het röntgenlicht gemeten door GOES. De gemeten intensiteit

van zonnevlammen hangt sterk af van het niveau van de achtergrond van de röntgenstralen.

Complexe configuraties kunnen enkel C-type zonnevlammen produceren omdat het achtergrondniveau laag is, en omgekeerd. De zonnevlammen die we zien op deze GOES grafiek moeten door de voorspeller geassocieerd worden met een bepaald actief gebied. Dit gebeurt door het bestuderen van zonnebeelden die op hetzelfde tijdstip genomen werden.

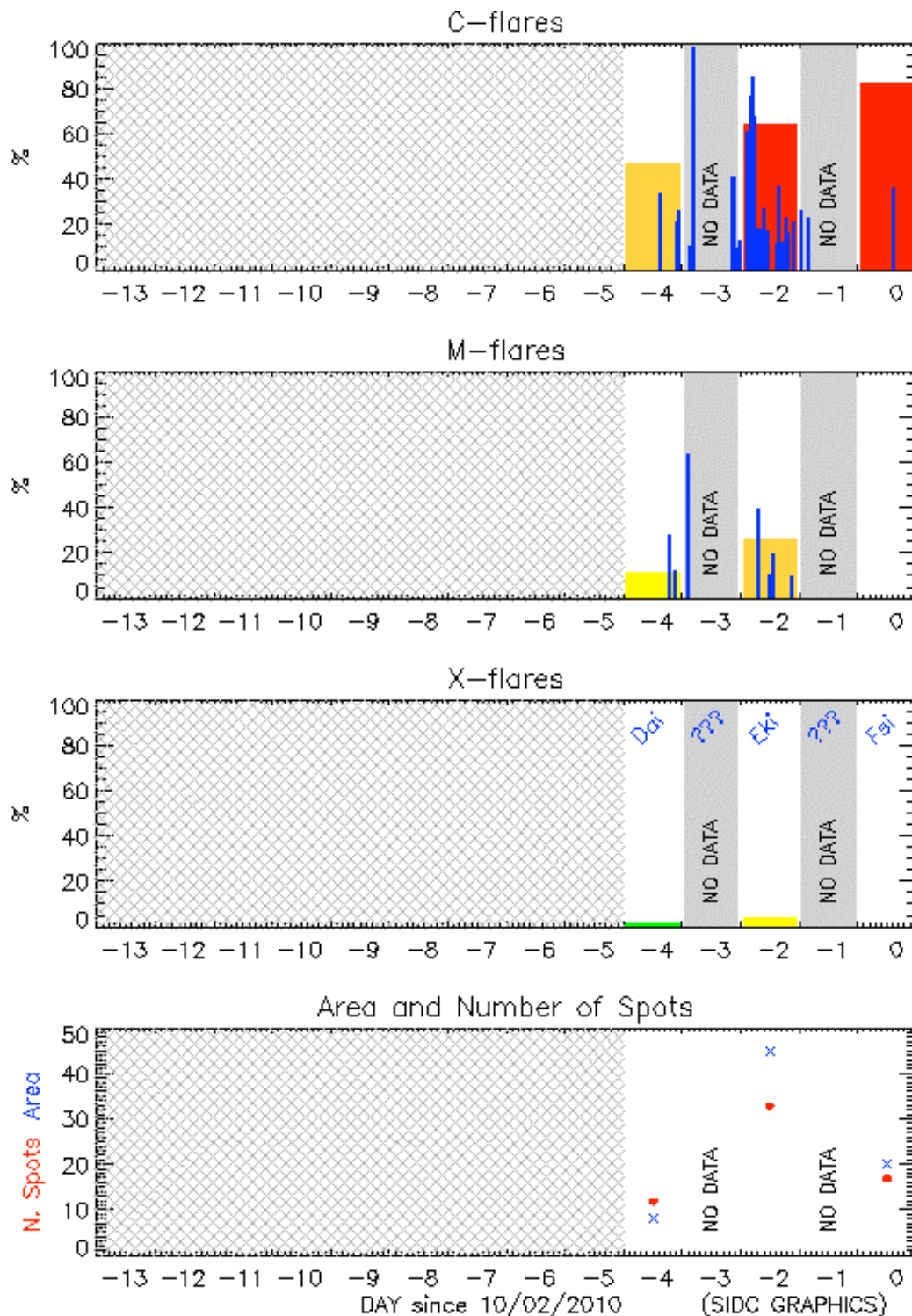
Een andere manier om de kans op zonnevlammen in de nabije toekomst te voorspellen, is door naar de aanwezige zonnevlekkengroepen te kijken. Zonnevlekkengroepen worden in zestig McIntosh klassen ingedeeld, gebaseerd op de totale magnetische flux in het actief gebied en het magneetveld van de grootste 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. Deze berekeningen worden automatisch uitgevoerd voor de voorspellers en zijn te raadplegen via de website.

Op de webpagina staat er een zwarte kader met een schematische tekening van de Zon (Figuur 10). Hierop worden alle zonnevlekkengroepen en actieve gebieden getoond die op dat moment te zien zijn op de Zon. Hiervoor worden twee soorten van nummering gebruikt: die van het Astrofysisch Observatorium in Catania (in het groen) en die van het Amerikaanse NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, in het rood). De NOAA classificatie geeft ook de magnetische classificatie van het actieve gebied weer (alfa, bèta, ...). In het blauw staan de



Figuur 10: Schematische weergave van de Zon op de SIDC webpagina. Hierop staan actieve gebieden aangeduid die op 11 februari 2010 zichtbaar waren op het zonsoppervlak. Het actieve gebied NOAA 1045 dat later besproken zal worden, is hier zichtbaar aan de westelijke zonnerand actieve gebieden aangeduid die gekend zijn van een vorige zonnerotatie en waarvan we verwachten dat ze binnenkort weer te voorschijn zullen komen. Een klik op de groene Catania nummers toont het resultaat van de kansberekening gebaseerd op de McIntosh klassen (Figuur 11). De rode NOAA getallen leiden naar de webpagina's van de Solar Monitor. Hierop kan je het actieve gebied aan de hand van waarnemingen in verschillende golflengtes in meer detail bestuderen. Dit alles samen geeft de voorspeller een goed idee van de (statistische) kans dat er zich een zonnevlam kan voordoen in een bepaald actief gebied.

Op de website van het SIDC wordt de betekenis van de verschillende classificaties in meer detail uitgelegd op deze pagina: <http://www.sidc.be/educational/classification.php>



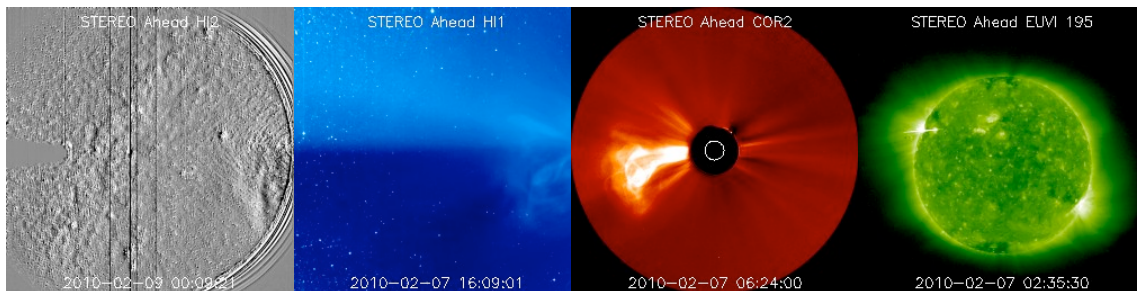
Figuur 11: De berekening van de kans op C-, M- en X-type zonnevlammen door het SIDC voor het actieve gebied Catania 40 (NOAA 1045) op 10 februari 2010. Dit gebied produceerde in de dagen voordien verschillende M-type zonnevlammen.

Een zonnevlam kan gepaard gaan met een **coronale massa-ejectie** (CME). Vooral wanneer de uitbarsting aan de voorzijde van de Zon plaatsvindt, is de voorspeller op zijn hoede. Dit betekent immers dat de uitbarsting naar de Aarde gericht is en dat de kans dat de toestand hier op Aarde erdoor beïnvloed zal worden, is dan ook groter.

Meestal worden CME's eerder waargenomen dan voorspeld. Bij langdurige zonnevlammen kan de voorspeller vermoeden dat er een CME zal volgen. Ook het plotse verdwijnen van een protuberans kan wijzen op een CME. In een film van differentiële EIT beelden gaat de voorspeller op zoek naar een EIT golf. (De automatische detectie van EIT golven gebeurt met onze eigen software NEMO: <http://sidc.oma.be/nemo/>. Een andere bron van informatie is: http://lasco-www.nrl.navy.mil/javagif/java_movie5.html)

Ook radio-uitbarstingen (te zien via <http://sidc.oma.be/humain/realtime.php>) kunnen verbonden zijn aan een CME.

Het waarnemen van CME's gebeurt door middel van coronografen (vb LASCO of STEREO). Deze coronografen bootsen een eclips na door het licht van de zonneschijf te blokkeren en tonen zo de activiteit in de ijlere corona. Een witte cirkel in het midden van het beeld geeft de grootte van de Zon weer. De coronografen van LASCO zijn rechtstreeks naar de zon gericht, waarbij C2 en C3 delen van de corona bekijken die respectievelijk verder van het zonnecentrum verwijderd zijn. STEREO bekijkt de zon van opzij en heeft instrumenten aan boord die telkens een ander stukje van de ruimte tussen de Zon en de Aarde in beeld brengen. Zo kunnen we een CME volgen vanaf het vertrek op de Zon tot de aankomst op Aarde door achtereenvolgens naar de STEREO EUVI, COR1, COR2, HI1 en HI2 beelden te kijken (Figuur 12).



Figuur 12: De CME, geassocieerd met de zonnevlam die op 7 februari 2010 's ochtends vroeg door NOAA 1045 geproduceerd werd, is te zien in alle instrumenten van STEREO-A. Het actieve gebied bevindt zich in het rechtse EUV-beeld aan de linkerkant van de Zon. De CME is te volgen, van rechts naar links, helemaal tot aan de Aarde, aan de linkerkant van het grijze HI2 beeld. Merk op dat de CME tijd nodig heeft om de afstand tussen de Zon en de Aarde te overbruggen en pas dagen later op Aarde aankomt.

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 zonneschijf (aan de voor- of achterkant) 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. Om het verschil te zien tussen een halo CME aan de voorkant of de achterkant, gebruiken we de differentiële EIT beelden, want wanneer de CME aan de voorkant gebeurt, moeten we die ook zien bewegen op de zonneschijf.

We kunnen ook gebruik maken van de STEREO beelden om te zien of een CME naar de Aarde gericht is. STEREO bestaat uit twee satellieten die de Zon zijdelings observeren, ieder van een andere kant. STEREO-B ziet de Zon zoals wij op Aarde ze binnen een week zullen zien en is dus zeer nuttig om het toekomstige ruimteweer te voorspellen. Omdat beide satellieten zijdelings naar de Zon kijken, zien zij met hun coronografen een CME die naar de Aarde is gericht aan de zijkant van de zonneschijf. Een aardgerichte CME verschijnt voor STEREO-B en STEREO-A respectievelijk aan de rechterkant en de linkerkant van de zonneschijf.

Ten slotte maken de voorspellers gebruik van CACTUS. Dit is software ontwikkeld aan de Koninklijke Sterrenwacht die automatisch CME's detecteert in LASCO beelden en een schatting geeft van hun snelheid. De resultaten van deze detectie verschijnen op de website: <http://sidc.oma.be/cactus/out/latestCMEs.html>

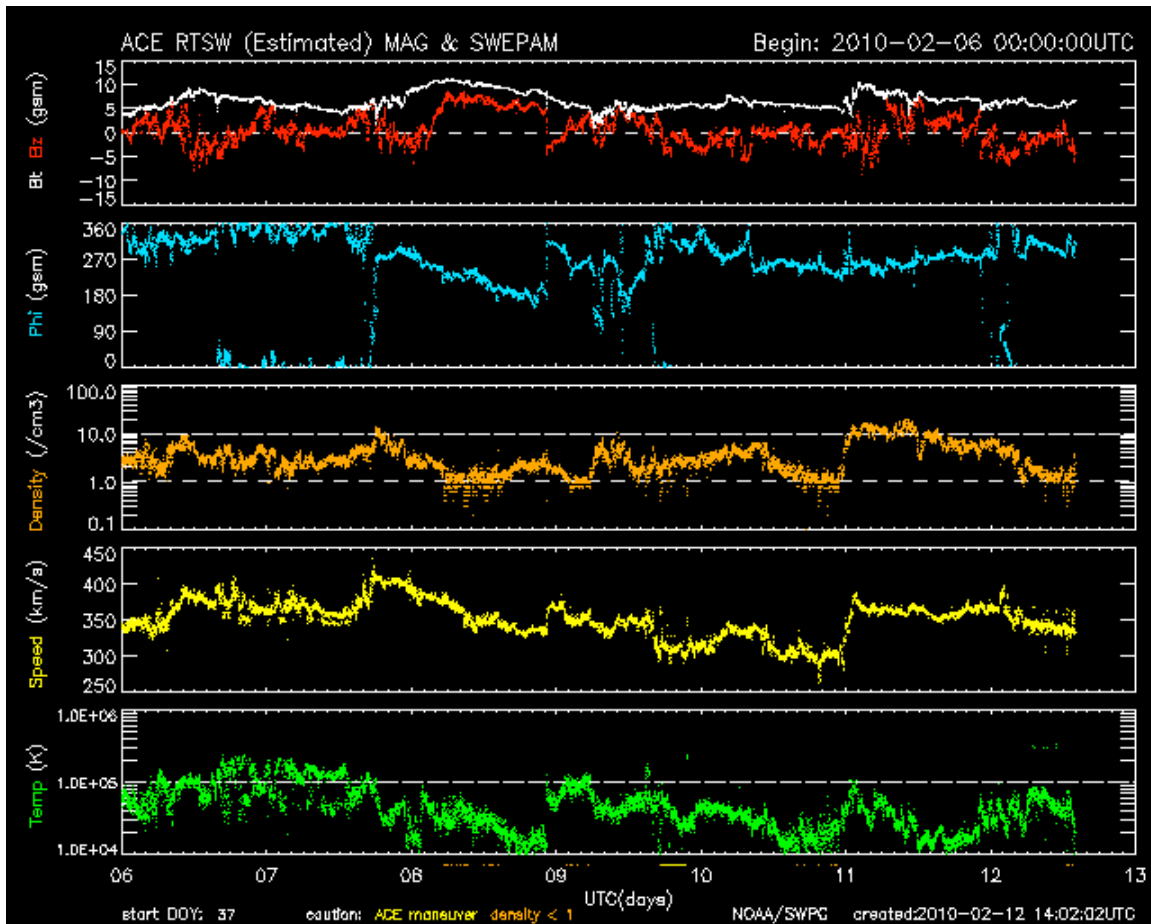
Een CME met voldoende snelheid zal een schokgolf veroorzaken in de zonnwind en zo de geomagnetische toestand op Aarde beïnvloeden. Rekening houdend met de beginsnelheid van de CME en de snelheid van de zonnwind op dat moment, schat de voorspeller de verwachte aankomsttijd van de CME bij de Aarde en waarschuwt bij een voldoende sterke CME die naar de Aarde is gericht voor een geomagnetische storm.

Om de **10,7cm flux** van de Zon te voorspellen, moet met verschillende bijdrages rekening gehouden worden. Om te beginnen worden de recente metingen van deze zonneflux door verschillende observatoria met elkaar vergeleken.

(Vb. via <http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/radio/rad.txt>, kijk naar de frequentie 2695 MHz) Omdat deze flux goed gecorreleerd is met het zonnevlekkengetal, kijkt de voorspeller aan de oostrand van de zonneschijf (links) naar het verschijnen van terugkerende zonnevlekgroepen en aan de westrand (rechts) naar de zonnevlekengroepen die net achter de rand verdwijnen. Deze dragen respectievelijk bij tot een toename en een afname van de 10,7 cm flux. Omdat de radioflux in de atmosfeer gevormd wordt, komen de bijdrages echter niet enkel van de vlekken die zichtbaar zijn op de zonneschijf, maar ook van vlekken aan en net achter de rand. We kijken bovendien ook naar de aanwezigheid van coronale gaten op de zonneschijf want die zorgen voor een afname van de 10,7cm flux. Ten slotte wordt bij de voorspelling rekening gehouden met de activiteit in het verleden door de huidige flux te vergelijken met de waarde van 27 dagen eerder (één zonnerotatie geleden). Ook een lineaire extrapolatie van de fluxwaarden van de voorbije dagen kan een goede indicatie zijn voor de toekomst.

3.2 Stap 2: De schakel tussen Zon en Aarde

De **zonnwind** is een constante stroom van geladen deeltjes die vanuit de Zon vertrekt in alle richtingen en zo de schakel vormt tussen de Aarde en de Zon. Door de rotatie van de Zon nemen de magnetische veldlijnen ervan de vorm aan van een Archimedesspiraal. De zonnwind beweegt zich volgens deze veldlijnen. Dit wil zeggen dat de wind die vanop het westelijk halfrond van de Zon vertrekt door de magnetische veldlijnen zal afgebogen worden en de Aarde zal beïnvloeden. Daarom concentreert de voorspeller zich vooral op de rechterkant van de zonneschijf om de effecten van het zonneweer op de zonnwind in te schatten. Er wordt bijvoorbeeld gekeken naar de aanwezigheid van coronale gaten op dit halfrond. Deze gaten zijn bronnen van snelle zonnwinden die een schokgolf, die Coroterende Interactie Regio (CIR) genoemd wordt, kunnen veroorzaken in de tragere, constante zonnwind. Wanneer deze regio de Aarde passeert, kan dat een geomagnetische storm veroorzaken.



Figuur 13: Zonnewindparameters gemeten door de ACE satelliet. Er is een schok te zien in alle grafieken 's ochtends vroeg op 11 februari 2010. Dit is de aankomst van de CME die op 7 februari 2010 was vertrokken van NOAA 1045.

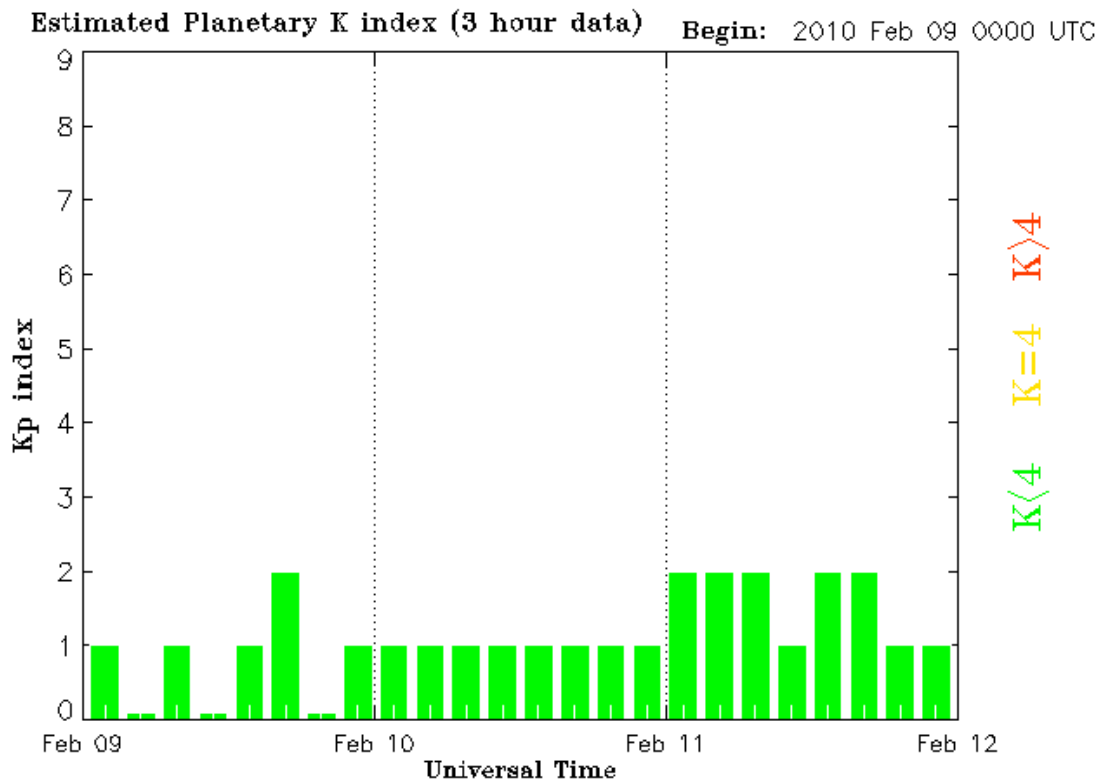
De ACE gegevens van NOAA geven de voorspeller informatie over de toestand van de zonnewind. (http://www.swpc.noaa.gov/ace/MAG_SWEPAM_3d.html)

Op de bovenste grafiek in Figuur 13 wordt in het rood de noord-zuid component van het interplanetair magneetveld (Bz) weergegeven. De witte lijn duidt de grootte van het totale magneetveld aan. De koppeling tussen het aardse magneetveld en de zonnewind is veel sterker als het interplanetair magneetveld (IMF) zuidwaarts is gericht. Wanneer de satelliet zich aan de dagzijde bevindt, betekent dit dat de magnetosfeer van de Aarde wordt samengedrukt tot binnen de geostationaire baan van de satelliet. Er wordt dan een zuidwaarts gericht en/of erg fluctuerend magneetveld gemeten. Aan de nachtzijde wijst een zuidwaarts gericht magneetveld op een versterking van de elektrische stromen in de staart van de Aardse magnetosfeer. De voorspeller let dus in de ACE gegevens op een negatieve waarde voor Bz die kleiner is dan -10 nT. Een plotse schok in de verschillende windparameters die door ACE gemeten worden kan wijzen op de aankomst van een CME, op de aanwezigheid van een coronaal gat of het doorkruisen van het **heliosferisch elektrisch stroomvlak**. De invloed van zo'n schok op de Aarde hangt sterk af van de snelheid van de zonnewind op dat moment. Bij een trage wind (<400 km/s) heeft een storing weinig effect. Bovendien moet een storing voldoende lang duren vooral ze geo-effectief kan zijn.

Zonnevlammen en CME's sturen grote hoeveelheden energetische deeltjes de interplanetaire ruimte in. De gegevens van de GOES satelliet vertellen de voorspeller hoe het zit met de inkomende **elektronen- en protonenflux**. (http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/satenvBL.html) Op de grafiek wordt met een stippellijn een grenswaarde aangeduid. Wanneer de protonenflux deze limiet overschrijdt, wordt er een waarschuwing uitgestuurd.

3.3 Stap 3: De invloed op de Aarde

De invloed van het weer op de Zon wordt op Aarde vooral gemeten via het effect op het Aardse magneetveld. Grote veranderingen in dit magneetveld worden geregistreerd door middel van magnetogrammen. De index K geeft de verstoring van het geomagnetische veld weer voor een periode van 3 uur en definieert zo (de sterkte van) een geomagnetische storm. Voor elk meetstation wordt een lokale K-index bepaald. Verschillende lokale K-indices worden gecombineerd tot de planetaire index Kp. Deze heeft een logaritmische schaal met waarden van 0 tot 9. De **Kp-index** is af te lezen op een grafiek van NOAA: http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/kp_3d.html



Updated 2010 Feb 12 02:55:02 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

Figuur 14: De invloed van de geomagnetische storm, geassocieerd met de zonnevlam in NOAA 1045 was beperkt. De Kp bereikte een maximum van 2 op 11 februari 2010.

Een waarde groter dan 4 betekent dat er een zware storm op Aarde is aangekomen. Dit leidt dan bijvoorbeeld tot een verhoogde kans op noorderlicht.

(<http://www.swpc.noaa.gov/pmap/index.html>)

3.4 Stap 4: De ruimteweersvoorspelling opstellen

Ondertussen heeft de voorspeller al heel wat informatie verzameld om een antwoord te geven op de volgende vragen:

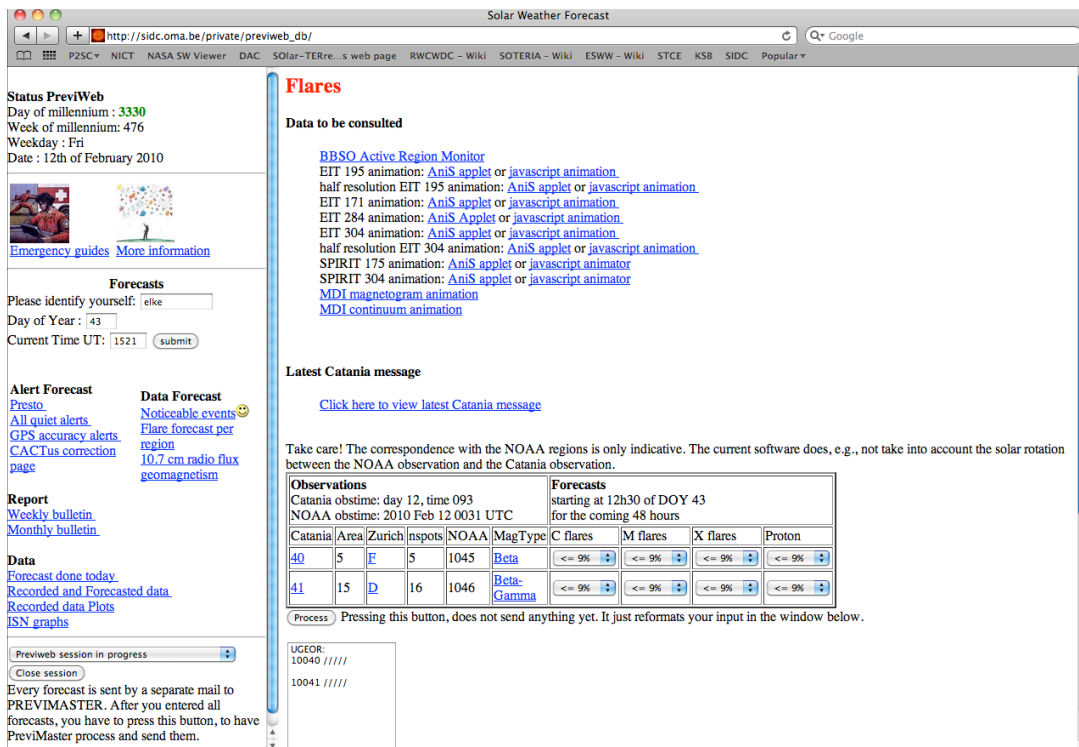
- Zijn er (nieuwe) coronale gaten op de zonnescijf? Zijn ze geo-effectief?
- Zijn er (nieuwe) actieve gebieden? Wat is hun magnetische classificatie?
- Is er een zonnevlam geobserveerd? Vanuit welk actief gebied?
- Was er een CME? Is die geassocieerd met een zonnevlam?
- Wat is de kans dat er zich een zonnevlam zal voordoen de komende dagen?
- Wat is de waarde van de 10.7 cm flux?
- Is de zonnwind op dit moment snel of traag?
- Is er een plotse toename geobserveerd in de parameters die de zonnwind beschrijven? Kan die verbonden worden aan een coronaal gat of aan een CME die de voorbije dagen heeft plaatsgevonden?
- Wat is de flux van de protonen en de elektronen?
- Hoe hoog is de Kp-index?

De antwoorden op al deze vragen moeten nu in een voorspelling gegoten worden. Daarvoor worden de voorspellingspagina's van het SIDC gebruikt. De voorspeller begint met het aanvullen van de 'noticable events' waarbij alle recent geobserveerde zonnevlammen met zoveel mogelijk informatie in een database gestopt worden. Mede op basis daarvan kan dan een voorspelling gemaakt worden per actief gebied voor de kans dat er zich in de nabije toekomst een nieuwe zonnevlam zal voordoen in dit actieve gebied. Daarmee hangt ook een inschatting samen van de kans op een 'proton event'. (Figuur 14)

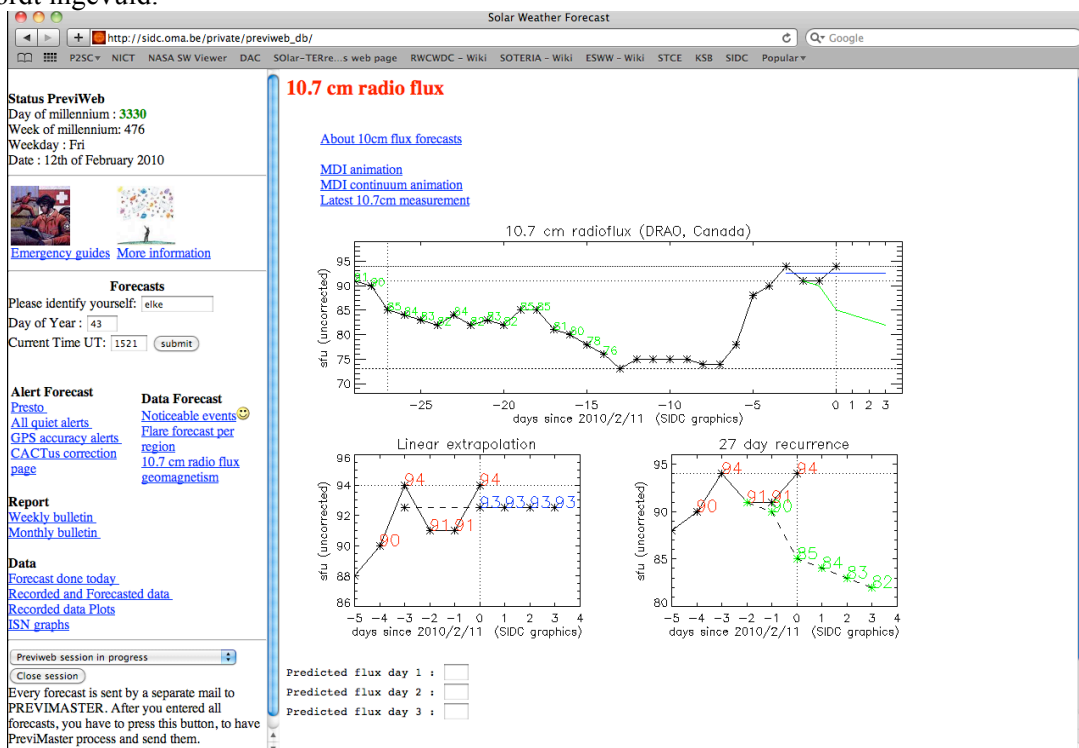
De derde stap is het voorspellen van de waarde voor de 17,5 cm flux. Hiervoor wordt de voorspeller geholpen door een aantal grafieken die de huidige waarde, de lineaire extrapolatie ervan en de waarden tijdens vorige rotaties weergeven. Op basis hiervan geeft de voorspeller een fluxwaarde voor de komende drie dagen. Hetzelfde doet hij/zij ook voor de K-index. Per tijdsperiode van drie uur wordt voor de komende drie dagen een waarde voorspeld. Bovendien wordt er ook een globale voorspelling van de magnetische activiteit gegeven voor de nabije toekomst. (Figuur 16)

Tenslotte kan de voorspeller in een tekstbericht uitleg geven over de voorspelling van die dag. In dat bericht worden ook de belangrijkste waarnemingen zoals zonnevlammen, CME's en coronale gaten vermeld (in het Engels). Bij belangrijke en plotse gebeurtenissen kan de voorspeller ook beslissen om het uur van de dagelijkse voorspelling niet af te wachten en een onmiddellijk een bericht uit te sturen dat een 'presto' wordt genoemd. Het resultaat van de voorspelling is een e-mail die wordt uitgestuurd naar alle geregistreerde gebruikers (Figuur 17). Bovendien wordt de voorspelling op de startpagina van het SIDC geplaatst.

Naast een dagelijkse voorspelling van het ruimteweer, maken de voorspellers van het SIDC ook een wekelijks en een maandelijks rapport van de activiteit van de Zon en het ruimteweer. Deze rapporten worden ook via de website en via email verspreid.



Figuur 15: De voorspellingspagina van het SIDC waarop de kans op zonnevlammen (flares) wordt ingevuld.



Figuur 16 Deze grafieken helpen de voorspeller bij het geven van een waarde voor de 10,7 cm flux voor de komende drie dagen.

```

:Issued: 2010 Feb 07 1237 UTC
:Product: documentation at http://www.sidc.be/products/meu
#-----#
# DAILY BULLETIN ON SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY from the SIDC #
# (RWC Belgium) #
#-----#
SIDC URSIGRAM 00207
SIDC SOLAR BULLETIN 07 Feb 2010, 1219UT
SIDC FORECAST (valid from 1230UT, 07 Feb 2010 until 09 Feb 2010)
SOLAR FLARES : Active (M-class flares expected, probability >= 50%)
GEOMAGNETISM : Active conditions expected (A>=20 or K=4)
SOLAR PROTONS : Quiet
PREDICTIONS FOR 07 Feb 2010 10CM FLUX: 093 / AP: 007
PREDICTIONS FOR 08 Feb 2010 10CM FLUX: 096 / AP: 011
PREDICTIONS FOR 09 Feb 2010 10CM FLUX: 099 / AP: 024
COMMENT: Solar activity is expected to reach active levels with risks
of M-class flares from NOAA AR 1045. This region, located at N20E09,
produced a M6.4 flare on Feb. 7th, peaking at 02:34 UT. A halo CME was
observed, linked to this event. Geomagnetic activity is expected to be
mostly quiet during the next 24 hours. There is then a risk of increased
activity, possibly up to isolated minor storm conditions on Feb. 9th due
to the halo CME previously mentioned.

TODAY'S ESTIMATED ISN : 031, BASED ON 02 STATIONS.

SOLAR INDICES FOR 6 Feb 2010
WOLF NUMBER CATANIA : 033
10CM SOLAR FLUX : 088
AK CHAMBON LA FORET : ///
AK WINGST : 007
ESTIMATED AP : 006
ESTIMATED ISN : 023, BASED ON 10 STATIONS.

NOTICEABLE EVENTS SUMMARY
DAY BEGIN MAX END LOC XRAY OP 10CM RADIO BURST TYPES Catania NOAA
06 1847 1859 1909 N21E17 M2.9 SN III/1 40 1045
06 2131 2137 2142 N21E17 M1.3 III/1 40 1045
07 0220 0234 0239 N21E10 M6.4 1N 170 IV/2,III/2 40 1045
END

```

Figuur 17: Het ruimteweerbericht zoals het werd opgesteld door het SIDC op 7 februari 2010. Er wordt melding gemaakt van de zonnevlam en de bijbehorende halo CME die op de bovenstaande beelden en grafieken te zien was. De CME kwam uiteindelijk iets later aan op Aarde dan oorspronkelijk verwacht. Dit werd vermeld in het ruimteweerbericht van 11 februari 2010: “The plasma cloud associated with the M-flare of Feb 7 possibly arrived late Feb 10. This can be concluded from images taken by the heliospheric imagers onboard STEREO A and B. The influence is negligible: Kp reached only a maximum value of 2.”

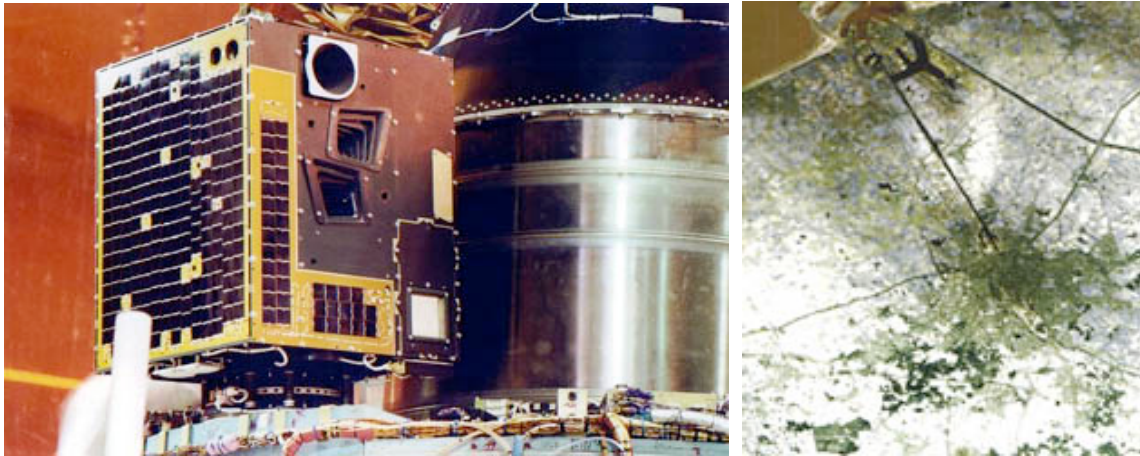
4 Het PROBA project

PROBA staat voor *PRoject for OnBoard Autonomy*, een project van het Europese Ruimte Agentschap ESA, dat in 1998 werd opgestart om nieuwe ruimtevaarttechnologieën in vlucht te demonstreren. De PROBA satellieten zijn klein, maar zitten propvol nieuwe ontwikkelingen op technologisch gebied. Als laatste fase in het ontwikkelingsproces worden deze innovaties het liefst tijdens een echte ruimtevlucht getest, zeker wanneer er risico's verbonden zijn aan het gebruiken van deze nieuwe technologieën. Hiervoor zijn de kleine en goedkopere mini-satellieten, zoals die uit de PROBA reeks, ideaal. Deze missies geven bovendien ook kleinere Europese technologiebedrijven de kans om ervaring in de ruimtevaart op te doen.

Het PROBA concept heeft als basisideeën dat de satelliet modulair opgebouwd wordt en in grote mate in staat moet zijn om autonoom te opereren. Ze kan heel stabiel en met een grote nauwkeurigheid gericht worden op het te onderzoeken object. Bovendien beschikken de PROBA ruimtetuigen over een krachtige computer om gegevens aan boord te verwerken en worden ze ontwikkeld op een korte tijdsschaal (2-3 jaar).

4.1 PROBA1

De eerste satelliet uit de PROBA familie, PROBA1, werd in India gelanceerd op 22 oktober 2001. Deze satelliet is nog steeds actief en gaat dus al vele jaren langer mee dan zijn geplande levensduur van 1 jaar. Vele van de technologieën aan boord van PROBA1 zijn voorlopers van wat er op PROBA2 te vinden is. PROBA1 heeft naast een technologische missie natuurlijk ook een wetenschappelijke missie: het observeren van de aarde en de ruimte in de onmiddellijke omgeving ervan. Hiervoor beschikt de satelliet over een spectrometer en verschillende camera's.



Figuur 18: PROBA1 gemonteerd op de lanceerraket (links) en het eerste beeld genomen door de satelliet (rechts). Dit beeld toont de stad Brugge in de sneeuw op 4 januari 2001 en werd genomen met het instrument CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer).

4.2 PROBA2

Net als PROBA1, is PROBA2 een kleine compacte satelliet die heel wat nieuwe ruimtevaarttechnologie moet demonstreren en bovendien een wetenschappelijke missie moet uitvoeren. Terwijl PROBA1 een satelliet voor aardobservatie was, richt PROBA2 zich op de Zon, het ruimteweer en de plasmafysica. De satelliet werd ontwikkeld door een internationaal consortium onder leiding van de Belgische firma Verhaert Space NV.

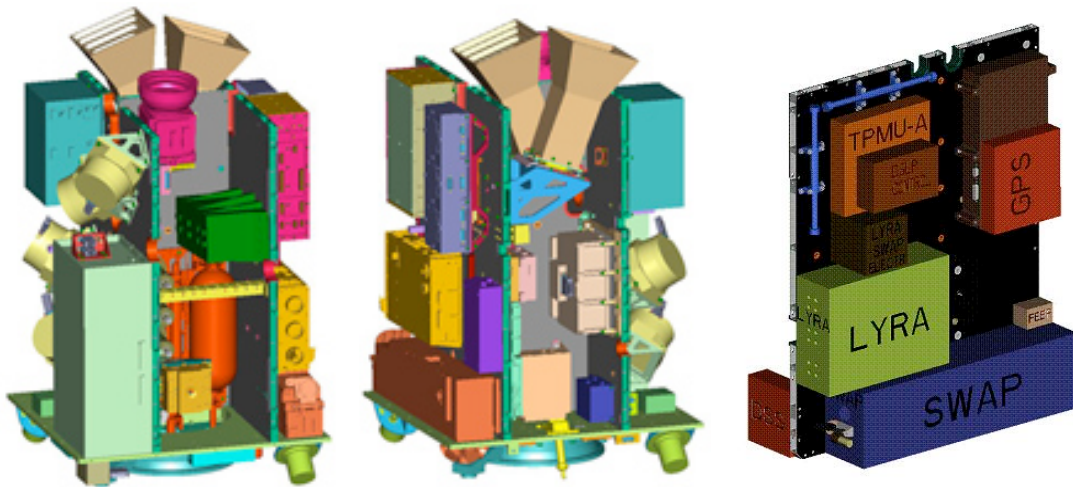
4.2.1 Het ontwerp van de PROBA2 satelliet

Het PROBA2-ruimtetuig heeft de vorm van een balk met als afmetingen 0,6 m x 0,7 m x 0,85 m. De satelliet weegt ongeveer 130 kg. De zonnepanelen aan de zijkant worden na lancering open geplooid. De buitenpanelen waarop geen zonnecellen zijn gemonteerd, zijn, naargelang hun locatie, zwart of wit geschilderd. Zo wordt op een passieve manier de temperatuur van de satelliet zoveel mogelijk onder controle gehouden. De wetenschappelijke instrumenten aan boord van de satelliet zijn immers continu naar de Zon gericht, wat een grote temperatuursgradiënt veroorzaakt doorheen het ruimtetuig. Ook is er verwarming voorzien aan boord om de temperatuur van de batterij te controleren en ook om de optische componenten van de LYRA- en SWAP-instrumenten te verhitten zodat ze gereinigd kunnen worden. De SWAP-telescoop aan boord van PROBA2 gebruik ook een radiator om zijn detector te koelen.

De stroom die PROBA2 nodig heeft, wordt gegenereerd met behulp van zonnecellen die werden gemonteerd op twee uitklapbare panelen aan de zijkant van de satelliet en één vast paneel in het midden. De zonnegeneratoren produceren maximaal 110W. Tijdens eclipsen of wanneer een bepaald experiment tijdelijk nood heeft aan meer stroom dan de zonnepanelen kunnen voorzien, kan men gebruik maken van een experimentele lithium-ion batterij (16,5 Ah) aan boord. Afhankelijk van de operatiemodus waarin PROBA2 zich bevindt, varieert het normale energieverbruik van de satelliet tussen 70 en 110 W.

Binnenin bestaat het ruimtetuig uit drie honingraatpanelen die zijn opgesteld in de vorm van een 'H' en een paneel op de bodem dat dienst doet als interface met de lanceerraket. Bijna alle systeemeenheden en instrumenten van de satelliet zijn gemonteerd op de honingraatpanelen aan

de binnenkant van de satelliet (Figuur 19). In totaal zijn er maar liefst 17 technologische experimenten en 4 wetenschappelijke instrumenten aan boord van PROBA2!



Figuur 19: Schetsen van de interne structuur van de PROBA2-satelliet

Om de exacte locatie en positie van de PROBA2-satelliet te bepalen maakt men gebruik van een dubbele *star-tracker* met een grote nauwkeurigheid (tot op 5 boogseconden), GPS-sensoren en een magnetometer die metingen verricht over drie ruimtelijke assen. Hiermee kan men PROBA2 stabiliseren ten opzichte van deze drie assen en men verwacht daarmee een nauwkeurigheid in het richten naar de zon van 100 boogseconden te kunnen bereiken. Het draaimoment om de satelliet te richten wordt geleverd door de reactiewielen van Dynacon die opgeladen worden met behulp van magnetische koppels. Het bijsturen van de satellietbaan kan ook gebeuren met behulp van een 'resistojet' stuurraaket. Deze stuurraaket gebruikt Xenon als drijfgas. Wanneer de voorraad Xenon uitgeput is, wordt de gastank opnieuw onder druk geplaatst met behulp van stikstofgas dat wordt geleverd door een generator die stikstof in vaste vorm omzet in gas.

Autonome navigatie is mogelijk dankzij de GPS-positiebepaling en het doorrekenen van de baan. Omdat autonomie één van de kernideeën is van het PROBA-project, worden alle nodige berekeningen voor de navigatie en manoeuvres aan boord uitgevoerd.



Figuur 20: het grondstation in Redu

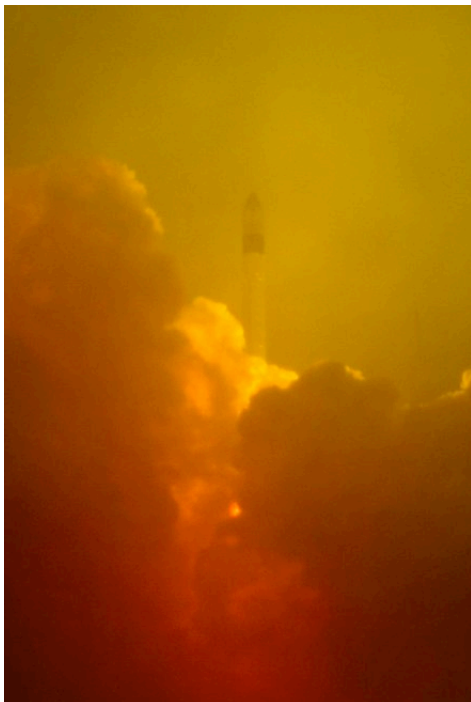
4.2.2 Communicatie met PROBA2

Tijdens normale operaties communiceert PROBA2 via een S-band verbinding met het ESA grondstation in Redu (België), dat uitgerust is met een schotelantenne van 2,4 m. Deze antenne wordt ook gebruikt voor de PROBA1-satelliet, maar omdat de baanvlakken van beide PROBA-satellieten bijna loodrecht op elkaar staan, is er meestal geen overlap in de zichtbaarheid van de satellieten.

Het grondstation in Redu kan gemiddeld 5 contacten per dag tussen de grond en de satelliet voorzien die elk gemiddeld 7,9 minuten duren. Dit betekent een totaal van 40 minuten per dag. De maximale periode tussen twee grondcontacten in Redu is 12 uur en deze onderbreking doet zich regelmatig voor. Dit vormt een probleem voor de ruimteweertoepassingen waarvoor men de gegevens van PROBA2 wil gebruiken en die nood hebben aan bijna doorlopende informatie (met onderbrekingen van maximaal een paar uur). Het grondstation in Spitsbergen, Noorwegen, wordt daarom tijdens de lancering en in de eerste fase van de operaties ook gebruikt om zo meer wetenschappelijke gegevens naar beneden te kunnen halen.

Vanuit Redu worden de besturingscommando's naar de satelliet gestuurd en hier worden ook de wetenschappelijke data ontvangen. De S-band telemetrieverbinding kan een dataverkeer tot 1 Mb/s aan. Na het maken van het contact met de satelliet en een aantal controles, blijft hiervan nog 877 Kb/s over waarvan 30% nodig is voor de telemetrie en er dus 70% (614 Kb/s) overblijft voor LYRA en SWAP (waarbij verondersteld wordt dat de andere instrumenten aan boord op het vlak van telemetrie verwaarloosd kunnen worden). Met een dagelijks contact van 40 minuten, betekent dit een (gecomprimeerd) datavolume van 1440 Mb/dag voor wetenschappelijke gegevens van SWAP en LYRA.

Als LYRA observeert aan een ritme van 100 Hz, produceert dit instrument 1030 Mb aan data. Dit kan gecomprimeerd worden tot niet meer dan 230 Mb. SWAP daarentegen neemt 1 beeld per minuut, wat neerkomt op een dagelijkse dataproductie van 17280 Mb. Daarom is de compressieverhouding die men moet bereiken voor SWAP 14 ($=17280/(1440-230)$). Zo'n hoge compressiefactor is ongezien voor beelden van de Zon en is dus een technologische ontwikkeling op zich binnen het SWAP-project.



Figuur 21: De Rockot raket die PROBA2 in zijn baan bracht, werd 's ochtends vroeg op 2 november 2009 gelanceerd in Plesetsk.

Na ontvangst stuurt het *Mission Operation Center* (MOC) in het grondstation in Redu de gecomprimeerde data van PROBA2 naar het *Science Operations Center* (SOC) van de Koninklijke Sterrenwacht van België. Hier worden de data omgezet in bruikbare wetenschappelijke gegevens en via het internet ter beschikking gesteld van andere wetenschappers en het brede publiek. Het SOC staat ook in voor het opstellen van de commando's die naar de satelliet gestuurd moeten worden en bepaalt zo het gebruik van de satelliet voor wetenschappelijk onderzoek. De wetenschappelijke planning van de observaties door SWAP en LYRA wordt gedaan op drie verschillende niveaus. Er wordt een planning op lange termijn opgesteld die rekening houdt met speciale gebeurtenissen zoals eclipsen en waarbij men uitkijkt naar kansen om simultaan te observeren met andere satellieten of grondinstrumenten. Dit wordt concreter uitgewerkt in een maandelijks schema, waarbij ook rekening gehouden wordt met de andere activiteiten van de satelliet (technologische demonstraties) en de periodes die nodig zijn voor de calibratie van de instrumenten aan boord. Verdere details zoals de concrete timing en de instellingen van de SWAP en LYRA instrumenten worden wekelijks gepland door de

operator van dienst. Iedere dag stuurt deze operator een IOS (Instrument Operations Sheet) voor SWAP en LYRA naar Redu. Dit IOS behandelt de komende 3 dagen zodat een mogelijk probleem met het doorseinen van de instructies tijdens het eerstvolgende contact in Redu, niet meteen leidt tot inactiviteit of risico's voor de satelliet.

De operator houdt, in nauwe samenwerking met het voorspellingscentrum van het SIDC, ook de dagelijkse zonneactiviteit in het oog en past de wekelijkse planning en het IOS aan in het geval van speciale gebeurtenissen op de Zon. Niet alleen kunnen die op wetenschappelijk gebied zeer interessant zijn om te bestuderen, ze kunnen ook een risico betekenen voor de instrumenten aan boord van PROBA2.

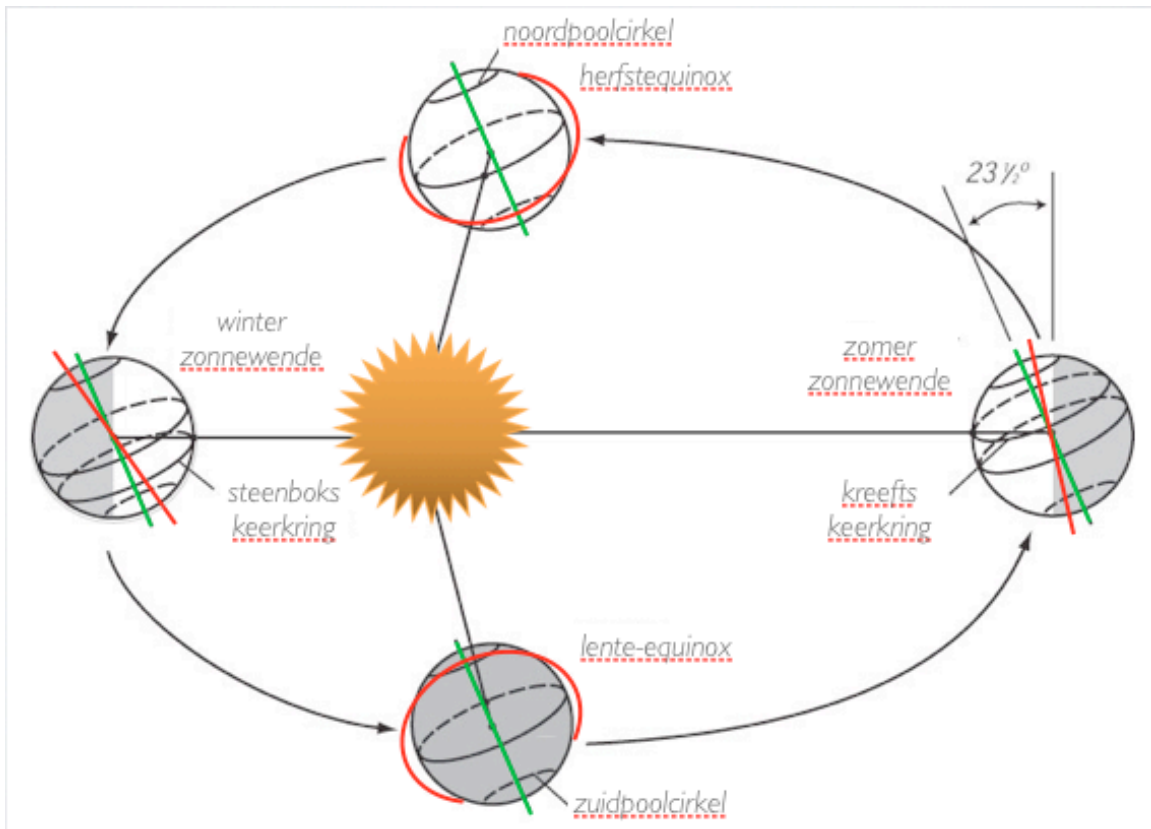
4.2.3 Lancering en baan van PROBA2

PROBA2 werd op 2 november 2009 om 2u50 (Belgische tijd) in zijn baan geslingerd door een Rockot raket vanuit Plesetsk, in het verre noorden van Rusland. De satelliet kreeg een lift van de ESA SMOS (Soil, Moisture and Ocean Salinity) missie. PROBA2 kwam terecht in een bijna cirkelvormige, net niet polaire, zonsynchrone baan met volgende kenmerken:

Baanparameters en -informatie	
Halve grote as	7135 $\pm$ 15 km
Excentriciteit	0,00116 - 0,0025
Inclinatie	98,445° $\pm$ 0,1°
Gemiddelde zonnetijd bij de klimmende knoop	06:00 $\pm$ 1 min
Gemiddelde hoogte boven het aardoppervlak	755 km
Aantal omwentelingen rond de aarde per dag	14,5
Orbitale periode	99,2 min
Periode vrij van (visuele) eclipsen	284 dagen
Maximale duur van een visuele eclips	18 min

Een zonsynchrone baan is een baan rondom de Aarde waarbij de hoogte en inclinatie zo worden gekozen dat de satelliet boven een bepaalde plaats op Aarde steeds op dezelfde lokale zonnetijd passeert. Een zonsynchrone satelliet kan bijvoorbeeld steeds op dezelfde lokale tijd de evenaar passeren, waarbij natuurlijk de lengtegraad steeds verandert omdat de Aarde onder de satelliet roteert.

Voor PROBA2 werd een zogenaamde *dusk-dawn* omloopsbaan gekozen. Dit houdt in dat de satelliet de evenaar rond zonsopgang (06:00 UT) kruist en dat ze ruwweg de scheidingslijn tussen dag en nacht op Aarde volgt. Het gevolg is dat PROBA2 continu in het zonlicht zweeft en bijna niet gehinderd wordt door de schaduw van de Aarde. Dit is cruciaal voor de energievoorziening (die gebaseerd is op zonnepanelen) en de wetenschappelijke experimenten aan boord (die de Zon bestuderen). De baan van PROBA2 wordt geschetst in Figuur 22. Op deze figuur is te zien dat het baanvlak van de satelliet licht gekanteld is (over een hoek van ongeveer 8°, hoek γ in Figuur 23) ten opzichte van de rotatie-as van de Aarde. Deze hoek veroorzaakt een precessiebeweging van het baanvlak (dat schuift ongeveer 1° per dag op naar het oosten). Op die manier wordt er gecompenseerd voor de rotatie van de Aarde rond de Zon.

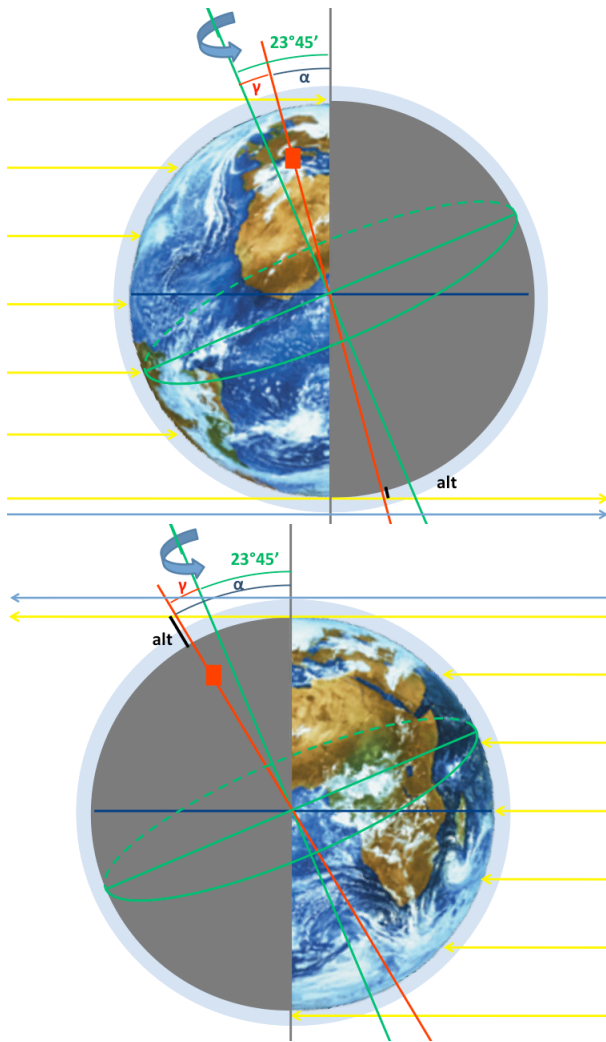


Figuur 22: De Zonsynchrone omloopbaan van PROBA2

De omloopbaan van PROBA2 is vrij van eclipsen voor meer dan 9 maanden per jaar en daarom zeer geschikt voor de instrumenten aan boord die de Zon observeren. Het eclipsseizoen begint elk jaar in november en duurt ongeveer 80 dagen tot in januari. Tijdens iedere omloop zijn er dan eclipsen waarvan de duur varieert tussen 0 en 18 minuten.

In Figuur 23 is de situatie op 21 juni en 21 december in detail getekend. De hoek α tussen het baanvlak en de schaduw van de Aarde veroorzaakt een eclipsperiode voor alle satellieten die op een hoogte lager dan 1159 km boven het Aardoppervlak vliegen. In juni is de minimale eclipsvrije hoogte 235 km, zodat PROBA2 met een gemiddelde hoogte van 755 km boven het aardoppervlak ongehinderd naar de Zon kan kijken.

Het gaat hierboven om visuele eclipsen, waarbij de aarde zich tussen de Zon en de satelliet bevindt. Daarnaast moet er ook rekening gehouden worden met UV-eclipsen. Die zijn er wanneer PROBA2 door de atmosfeer van de Aarde naar de Zon kijkt. De Zon is dan nog steeds zichtbaar in het visuele licht, maar de UV-straling wordt grotendeels geabsorbeerd door de Aardse atmosfeer zodat de UV-instrumenten SWAP en LYRA geen bruikbare gegevens kunnen verzamelen. Hoewel, LYRA maakt handig gebruik van deze UV-eclipsen voor het bestuderen van de Aardse atmosfeer.



21 JUNI

$$\alpha = 23^{\circ}45' - \gamma$$

$$\alpha = 15^{\circ}18'18''$$

$$alt = R[1/\cos \alpha - 1]$$

$$alt \approx 235km$$

21 DECEMBER

$$\alpha = 23^{\circ}45' + \gamma$$

$$\alpha = 15^{\circ}18'18''$$

$$alt = R[1/\cos \alpha - 1]$$

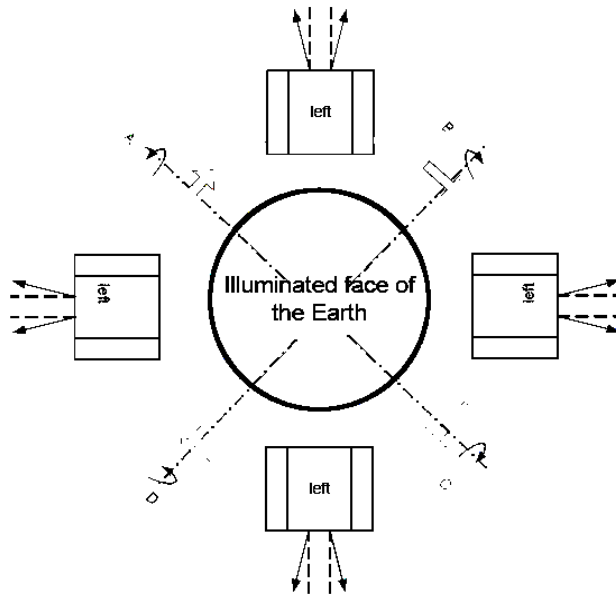
$$alt \approx 1159km$$

Figuur 23: Eclipsseizoenen voor PROBA2. De gele zonnestrallen geven de visuele eclips aan, de blauwe zonnestraal de UV-eclips. Voor deze laatste hebben we de atmosfeer rondom de Aarde getekend. UV-licht wordt in de aardatmosfeer geabsorbeerd. De berekening geldt voor de visuele eclips. R is de straal van de aarde, $\gamma = 8^{\circ}26'42''$.

PROBA2 oriënteert zich aan de hand van de 2 *star-trackers* aan boord van de satelliet. Om te voorkomen dat die verblind worden door het licht weerkaatst door de aarde, voert de satelliet vier keer per omloop (dus elke 24 minuten) een rotatie uit over een hoek van 90° (Figuur 24). De *star-trackers* willen een zicht op de sterren, niet op de aarde. Iedere rotatie neemt een paar minuten in beslag, zodat er in totaal per omloop ongeveer 20 minuten verloren gaan aan manoeuvres om de satelliet te stabiliseren. Door het autonoom verzamelen van baaninformatie is de satelliet zelf in staat om het beste moment te kiezen voor het uitvoeren van deze rotaties.

4.2.4 PROBA2 in een notendop

Lancering	2 november 2009 (samen met SMOS)
Lanceerraket	Rockot
Lanceerbasis	Kosmodroom Plesetsk, Rusland
Baan	Zonsynchroon, tussen 700 en 800 kilometer boven het aardoppervlak, in een hoek van $\sim 98^\circ$ met de evenaar
Standregeling	Gericht op de Zon, met automatische manoeuvres
Geplande levensduur	2 jaar
Afmetingen	600 mm x 700 mm x 850 mm
Massa	130 kg
Energieverbruik	53-86 Watt
Telecommunicatie	S-band, 64 kbit/s up, 1 Mbit/s down
Kostprijs	18 miljoen euro (exclusief lancering en operaties)
Aantal nieuwe, te testen technologieën aan boord	17
Aantal wetenschappelijke experimenten aan boord	4
Ontwikkeld door	Een international consortium onder leiding van Verhaert Space NV in België, filiaal van QinetiQ (GB)



Figuur 24: Rotaties van PROBA2 gedurende een omloop

4.2.5 Technologiedemonstraties aan boord van PROBA2

In totaal vliegen 4 wetenschappelijke instrumenten en 17 technologische ontwikkelingen mee op PROBA2. Tien Europese landen en Canada waren betrokken bij de bouw van de PROBA2-satelliet.



Figuur 25: PROBA2 kijkt naar de Zon. Aan de achterkant van de satelliet zijn de DSLP-antennes, de *star trackers* en cilindrische de S-band antennes die worden gebruikt voor de communicatie met de grond te zien. SWAP en LYRA bevinden zich aan de linkerzijkant van de satelliet.

De nieuwe technologieën kunnen in 2 grote groepen gesplitst worden: diegenen die integraal deel uitmaken van het satellietplatform en diegenen die ter demonstratie meevliegen en niet van levensbelang zijn voor de missie.

PROBA2 zal de werking demonstreren van:

- Een nieuw type lithium-ion batterij, ontwikkeld door SAFT (FR)
- Een geavanceerd boordcomputer (ADPMS van Verhaert Space NV) om de gegevens te verwerken en de energievoorziening te beheren, dat vele nieuw ontwikkelde componenten bevat, zoals een LEON processor.
- De panelen van de satelliet die een combinatie zijn van aluminium en koolstofvezel, ontwikkeld door Apco Technologies SA (CH)
- Nieuwe modellen van reactiewielen van Dynacon (CA), *star-trackers* van DTU (DK) en GPS ontvangers van DLR (DE)
- Een vernieuwd telecommandosysteem met digitale decoder die grotendeels geïmplementeerd werd door SST -SystemTechnik GmbH (DE)
- Een digitale zonnensensor, ontwikkeld door TNO (NL), die gebruik maakt van de actieve pixel sensor technologie (APS)
- Een GPS-ontvanger met dubbele frequentie, gemaakt door Alcatel Espace (FR)
- Een miniatuurversie van een commerciële GPS met een laag energieverbruik, ontwikkeld door DLR (D). Het is deze GPS die gebruikt wordt voor de normale positiebepaling van de satelliet.
- Een systeem van glasvezel (Fibre Sensor Demonstrator, FSD) dat de temperatuur op verschillende locaties in de satelliet meet en ook de druk in de omgeving ervan, ontwikkeld door MPB Communications Inc. (CA)
- Een nieuwe *star-tracker*, gemaakt door Galileo Avionica (IT) die getest moet worden met het oog op de ESA missies Solar Orbiter en BepiColombo, die Mercurius zal bestuderen. In Figuur 25 zijn twee *star trackers* te zien aan de bovenkant van de satelliet.

- Een *flux-gate* magnetometer (Science Grade Vector Field Magnetometer, SGVM) die meteen en met zeer hoge nauwkeurigheid de verschillende componenten van het magneetveld kan bepalen, ontwikkeld door DTU (DK). Dit instrument is vooral bedoeld voor wetenschappelijk onderzoek, maar kan ook gebruikt worden voor de positiebepaling van de satelliet.
- Een experimenteel Gallium-Arseen zonnepaneel dat de zonneflux concentreert en dat werd ontwikkeld door CSL (BE)
- Een voortstuwingsysteem werkend op Xenon gas met '*resistojet*' stuurraaket en een generator (COGEX, Cool Gas Generator Experiment) werkend op stikstofgas in vaste toestand om de brandstoftanks onder druk te brengen, ontwikkeld door SSTL (GB) en Bradford (NL). (Voor zijn wetenschappelijke missie heeft PROBA2 eigenlijk geen nood aan een voortstuwingsysteem, maar het kan wel gebruikt worden om te compenseren voor de veranderingen in de omloopsbaan van de satelliet in de loop van de missie.)
- Een microcamera (X-CAM) met een vaste focus en beeld van 120 graden breed, ontwikkeld door Microcameras & Space Exploration (CH)
- Nieuwe GNC algoritmes voor beeldverwerking uitgewerkt door NGC (CA)
- Een Credit Card Magnetometer (CCM) die het magneetveld meet langs drie orthogonale assen, ontwikkeld door Lusospace (P)
- Een Laser Retro Reflector (LRR) die laserpulsen komende van de Aarde reflecteert naar het grondstation om zo de satellietbaan te bepalen, ontwikkeld door Astrium (D).

Instrumenten voor zonneobservatie aan boord van PROBA2:

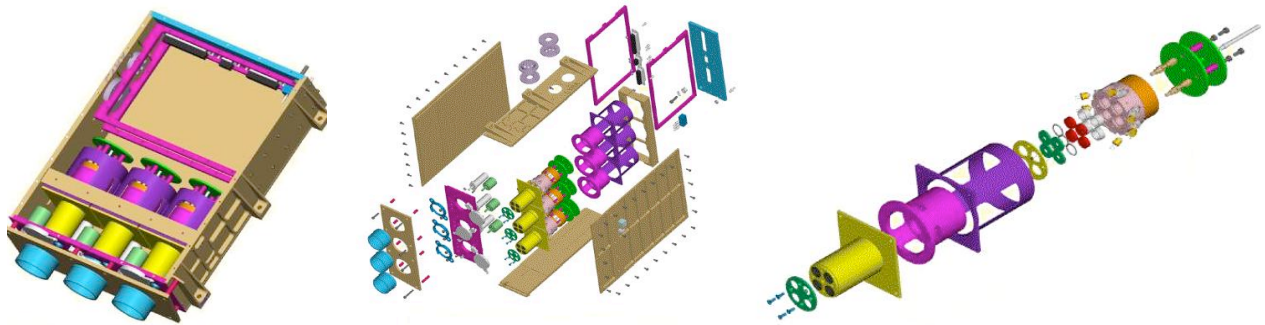
- Een Lyman-Alpha radiometer (LYRA) die 4 spectrale banden in het ultraviolette licht zal bestuderen, Hiervoor is het Centre Spatial de Liège het leidende instituut met de steun van de Koninklijke Sterrenwacht van België als wetenschappelijke leider en van een internationaal team bestaande uit PMOD (CH), IMOMEC (BE) en het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie (BIRA).
- Een extreem-UV telescoop SWAP die gebruik maakt van nieuwe pixel-sensor technologie (Active Pixel Sensor) om metingen te maken van de zonnecorona in een zeer nauwe spectrale band. Ook hiervoor is het Centre Spatial de Liège het leidende instituut met de steun van de Koninklijke Sterrenwacht van België als wetenschappelijke leider en van een industrieel team bestaande uit Alcatel Lucent (BE), AMOS SA (BE), DELTATEC (BE), Fill Factory NV (BE) en OIP NV (BE).

Instrumenten om het ruimteweer te bestuderen aan boord van PROBA2:

- De *Dual Segmented Langmuir Probe* (DSLPP) die metingen zal uitvoeren van de elektronendichtheid en de temperatuur in het achtergrondplasma in de Aardse magnetosfeer. In Figuur 25 zijn de twee antennes van de DSLPP te zien op de achterkant van de zonnepanelen.
- Een *Thermal Plasma Measurement Unit* (TPMU) die de dichtheid en samenstelling van ionen zal meten.

Beide instrumenten werden door een Tsjechisch consortium ontwikkeld, geleid door het Institute for Atmospheric Physics, Academy of Science of the Czech Republic (CZ).

4.2.6 De LYman Alpha Radiometer (LYRA)



Figuur 26: De LYRA radiometer, steeds verder gedemonteerd

4.2.6.1 Het instrument

De Lyman Alpha Radiometer bestaat uit 3 units met elk 4 detectoren die ieder de Zon kunnen bestuderen in 4 spectrale banden van het ultraviolette licht:

- 115-125 nm (Lyman-Alpha: 121,6 nm)
- 200-220 nm (Herzberg continuüm)
- 17-31 nm (kanaal van Aluminium filter met Helium II op 30,4 nm)
- 1-20 nm (kanaal van Zirconium filter)

Deze kanalen werden gekozen omwille van hun relevantie op het gebied van zonnefysica, aëronomie en ruimteweer. De UV-straling van de Zon (met golflengtes korter dan 300 nm) is de belangrijkste bron van energie die omgezet wordt in de Aardse atmosfeer en bepaalt zo, door dissociatie en ionisatie van fotonen, de thermische structuur, de dynamica en de chemische samenstelling van deze atmosfeer.

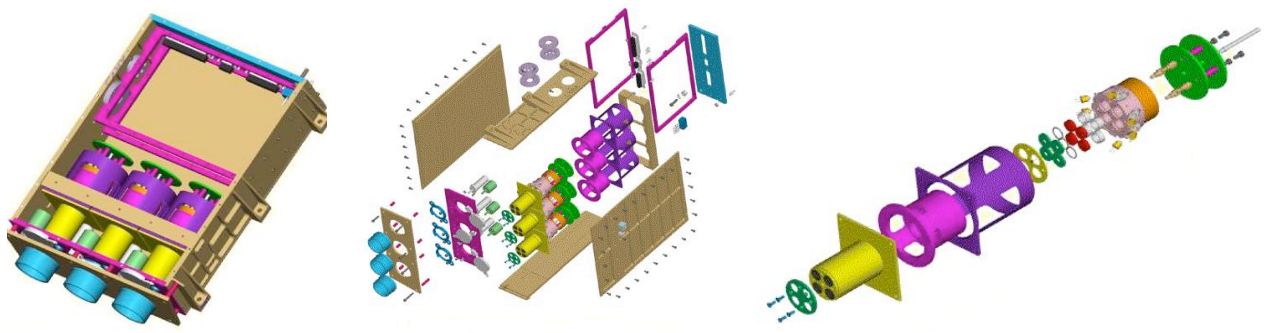
De LYRA-radiometer maakt gebruik van diamanten detectoren en is het eerste instrument waarmee deze innovatieve UV-detectoren in de ruimte uitgetest worden. De diamanten detectoren maken het instrument blind voor de optische Zon en maken zo een deel van de filters voor het zichtbaar licht overbodig. Dit is een groot voordeel omdat dit soort filters ook het gewenste ultraviolette signaal verzwakken. Met de diamanten detectoren wordt op die manier de precisie verhoogd en het ruisniveau naar beneden gehaald. Men heeft wel nog steeds filters nodig om de spectrale band te definiëren en om de infraroodstraling (en dus de warmte) te blokkeren.

Er zijn al heel wat andere experimenten die de UV- en X-straling van de volledige Zon bestuderen in verschillende golflengtes, met verschillende instrumenten en aan een verschillend tempo. De meerwaarde van LYRA is dat het instrument metingen zal uitvoeren van de zonne-intensiteit in 4 spectrale banden aan een frequentie hoger dan 10 Hz (zelfs tot 100 Hz), wat zeer veel is in vergelijking met andere radiometers. Ook is LYRA ontwikkeld om continu gegevens te verzamelen. Dat maakt het instrument uiterst geschikt om onverwachte en kortstondige fenomenen zoals zonnevlammen te bestuderen. Bovendien zal LYRA deze zonnevlammen niet alleen detecteren, maar ook een intensiteitsfunctie leveren die het belang van de geobserveerde zonnevlam aangeeft. Dit zal een continue functie zijn, in tegenstelling tot de drempelwaardes die nu gebruikt worden om de zonnevlammen te catalogeren (C-, M- en X-type zonnevlammen).

LYRA kan ook gebruikt worden om de Aardse atmosfeer te bestuderen met behulp van de *limb occultation* techniek. Tijdens zonsopgang en zonsondergang, gezien vanuit de PROBA2-satelliet,

kan LYRA een verticale scan maken van de Aardse atmosfeer. Bij het toepassen van deze techniek wordt de zonnestraling doorheen de rand van de atmosfeer gemeten. Door na te gaan hoeveel zonnestraling geabsorbeerd wordt door de atmosfeer bij verschillende golflengtes kan men bepalen welke deeltjes zich in deze luchtlagen bevinden.

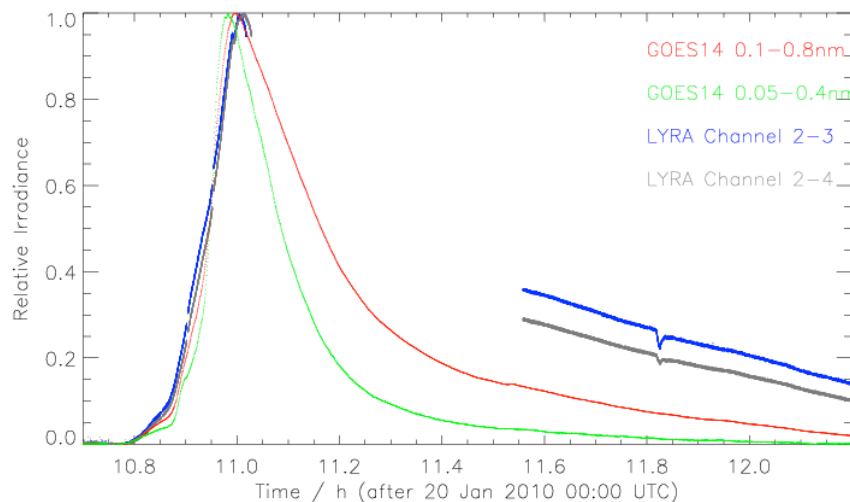
LYRA is een UV-radiometer gebouwd door een Belgisch-Zwitsers consortium (waaronder het Centre Spatial de Liège, de Koninklijke Sterrenwacht van België en het World Radiation Centre in Davos) met internationale medewerking van Duitsland, Japan, Frankrijk, Rusland en de USA.



Figuur 27: De LYRA radiometer, steeds verder gedemonteerd

4.2.6.2 De eerste waarnemingen

Op 2 november 2009 werd de PROBA2 satelliet met LYRA aan boord gelanceerd. Twee weken later, op 16 november 2009, werd het LYRA instrument voor de eerste keer aangeschakeld. De eerste tests in het donker konden beginnen. Op dat moment waren de deuren van LYRA immers nog gesloten, zodat er nog geen zonlicht op de detectoren kon vallen. Om het instrument te leren kennen en te kalibreren werden de eerste ‘waarnemingen’ gedaan met licht afkomstig van LED-lampen, gemonteerd binnenin het instrument.



Figuur 28: Op 20 januari 2010 om 10:48 UT namen LYRA en GOES een M1.8 zonnevlam waar.

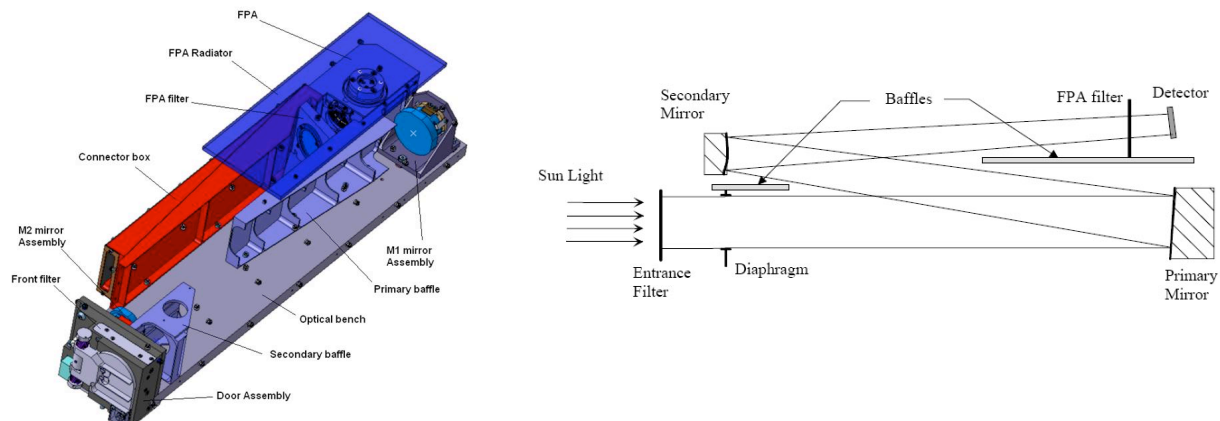
LYRA's ‘first light’ vond plaats op 6 januari 2010, na twee lange dagen waarin de drie deuren één voor één geopend werden. Op het einde van de tweede dag werd het instrument naar de Zon gericht. Alle 12 detectoren vingen een signaal op, wat betekende dat de fragiele filters en de detectoren de lancering goed hadden doorstaan!

Enkele dagen later kon LYRA al de eerste zonnevlammen waarnemen met een ongekend hoge

tijsdresolutie van 0,5 sec. Op 20 januari 2010 observeerde LYRA bovendien een M-type zonnevlam. Door het lange minimum waarin de Zon verkeerde, was dit zowat de eerste zonnevlam van deze sterkte in bijna 2 jaar tijd! LYRA was net op tijd opgestart om deze opwindende gebeurtenis te kunnen vastleggen.

4.2.7 De Sun Watcher using APS detectors and image Processing (SWAP)

4.2.7.1 Het instrument



Figuur 29: De opbouw van de SWAP UV telescoop

SWAP is een kleine telescoop die waarneemt in het extreme ultraviolet licht (EUV) en die daarbij gebruik maakt van nieuwe pixel-sensor technologie (Active Pixel Sensor, APS). SWAP zal beelden maken van de zonnecorona in een zeer nauwe spectrale band rond 17,5 nm. Het gezichtsveld van SWAP strekt zich uit over 54 boogseconden. Dit betekent ruwweg dat we een volledig zicht krijgen op alles wat zich binnen 1,67 keer de straal van de Zon afspeelt.

Met het SWAP-instrument wil men beelden maken van de zonnecorona bij een temperatuur van een miljoen graden. De hoge tijsdresolutie van 1 beeld per minuut maakt deze telescoop uiterst geschikt om de snelle evolutie van het ruimteweer in het oog te houden.

De ontwikkeling van SWAP is gesteund op de kennis die werd opgebouwd aan de hand van de EIT-telescoop (Extreme Ultraviolet Imaging Telescope) aan boord van de SOHO-satelliet (Solar and Heliospheric Observatory). Het grootste verschil met de EIT-telescoop is dat SWAP enkel beelden maakt in de spectrale band rond 17,5 nm, terwijl EIT over 4 spectrale banden beschikt. Eén daarvan, die rond 19,5 nm, wordt gebruikt om naar coronale massa-uitstoten (CME's) te kijken. Deze golflengte is ook zeer geschikt om zwakke kenmerken zoals coronale gaten in de zonnecorona te bestuderen. Door de nabijheid van de Fe XXIV spectraallijn treedt er bij deze golflengte jammer genoeg een verzadiging van de detector op wanneer er zich een zonnevlam voordoet. Deze verzadiging is op het beeld niet alleen te zien op de locatie van de zonnevlam, ook nabije donkere regio's worden verstoord door lichtverstrooiing. Om de verzadiging door zonnevlammen te vermijden, werd voor SWAP een filter gekozen die het licht met een golflengte rond 17,5 nm isoleert. In deze spectrale band zijn er geen andere spectraallijnen met dezelfde gevoeligheid voor zonnevlammen die de observaties kunnen verstoren.

De EIT-telescoop aan boord van SOHO neemt de zonnecorona al sinds 1996 continu waar. We weten niet hoelang deze telescoop het nog vol kan houden en daarom wordt er gezocht naar een opvolger. Hiervoor is SWAP een goede kandidaat. SWAP vertoont een aantal belangrijke verbeteringen ten opzichte van het oude EIT-design. Zo maakt men geen gebruik van een digitale CCD-camera, maar heeft men in de plaats een nieuwe CMOS-APS-detector, waarover een EUV-gevoelige laag werd aangebracht.

Bovendien is SWAP in staat om 1 beeld per minuut te maken, wat veel frequenter is dan EIT en daarmee kan het EIT-project om continu op de uitkijk te staan voor coronale massa-uitstoten voortgezet worden. Met dat snellere observatieritme hoopt men ook een meer gedetailleerde studie te kunnen uitvoeren van EIT-golven. Deze golven zijn één van de meest opvallende ontdekkingen die gedaan werden aan hand van EIT-beelden en worden geassocieerd met de beginfase van CME's. Door de lagere frequentie van EIT-beelden (1 beeld per 12 minuten) kan men hiermee voorlopig niet veel meer doen dan vaststellen dat er een golf was en de bron ervan lokaliseren.

Het beperkte gezichtsveld van EIT zorgt er bovendien voor dat het moeilijk is om hiermee uitbarstingen boven de zonnerand te bestuderen. Een protuberans die uitbarst is vaak hoogstens op 1 beeld vastgelegd en zelfs dan meestal slechts gedeeltelijk. Het gezichtsveld van SWAP is 20% groter en men kan dus meer van deze uitbarstingen waarnemen met dit instrument. Bovendien is SWAP de enige EUV-telescoop die kan wegstijgen van het zonnecentrum om het deel van de corona dat verder ligt van de Zon (tot 3 keer de straal van de Zon) in beeld te brengen en coronale massa-uitstoten en zonnevlammen te volgen. Hiervoor moet de hele PROBA2-satelliet gedraaid worden, maar omdat het hier gaat om een draaiing over een hoek kleiner dan 1 graad, veroorzaakt dit geen problemen voor de andere instrumenten aan boord.

Omwille van de baan waarin SOHO rondcirkelt (rondom het Lagrange punt L1) is de satelliet onbeschermd tegen protonenstormen die de waarnemingen verstoren. Juist bij belangrijke gebeurtenissen in het ruimteweer, wanneer de gegevens hier op aarde het meest nodig zijn voor de ruimteweervoorspellingen, is SOHO niet in staat om beelden te leveren. Omdat PROBA2 daarentegen laag rond de aarde cirkelt, wordt deze satelliet bij een protonenstorm grotendeels beschermd door het Aardse magneetveld en kan ze beelden van de Zon blijven maken.

De verwerking van de SWAP beelden gebeurt automatisch aan boord van de satelliet. Hierdoor kan men de hoeveelheid wetenschappelijke gegevens die via de beperkte communicatie met de grondstations kan doorgestuurd worden, aanzienlijk verhogen. De verwerking bestaat uit een compressie van de beelden en het voorrang geven aan bepaalde beelden op basis van hun inhoud. Ook het automatisch detecteren van ruimteweerfenomenen zoals zonnevlammen, EIT-golven en het uitbarsten van protuberansen is voorzien en bepaalt mee de prioriteit van de genomen beelden.

SWAP werd volledig ontwikkeld en getest in België onder leiding van het Centre Spatial de Liège voor de Koninklijke Sterrenwacht van België.

4.2.7.2 De eerste waarnemingen

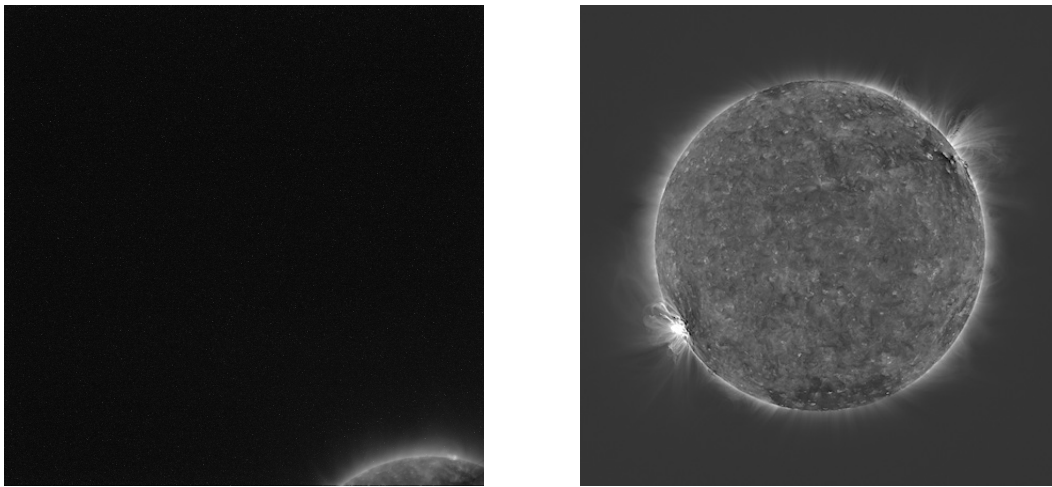
Nadat op 16 november 2009 LYRA voor de eerste maal aangezet werd, was het een dag later de beurt aan de SWAP telescoop. Op 20 november werd het allereerste (zwarte) beeld van SWAP naar de grond gebracht. Ook werden er een hoop beelden gemaakt met de LEDs die in SWAP zijn ingebouwd met als doel het kalibreren van de telescoop.

Na dit succes, was de volgende grote stap voor SWAP het openen van de deur. Dit was een

kritieke fase omdat de deur van SWAP slechts éénmaal geopend kon worden. PROBA2 maakte deze gebeurtenis op 14 december 2009 extra spannend door de computer aan boord van de satelliet opnieuw op te starten, net voor de geplande deuropening. Hierdoor werd PROBA2 radiostil.

Het eerste beeld na de deuropening werd enthousiast onthaald. Het toonde immers dat de deur geopend was, dat de filter in orde was en dat de detector het signaal van de Zon goed kon ontvangen! Meteen was echter ook te zien dat het richten van de satelliet naar de Zon nog niet zo goed lukte. In de weken nadien boekte men veel vooruitgang op dit vlak zodat de Zon volledig in SWAP's gezichtsveld kwam te liggen.

Sindsdien neemt SWAP bijna dagelijks beelden van de Zon. Op 15 januari bracht de telescoop zelfs een ringvormige zonsverduistering in beeld. Ook de eerste M-type zonnevlammen van de nieuwe zonnecyclus werden door SWAP waargenomen.

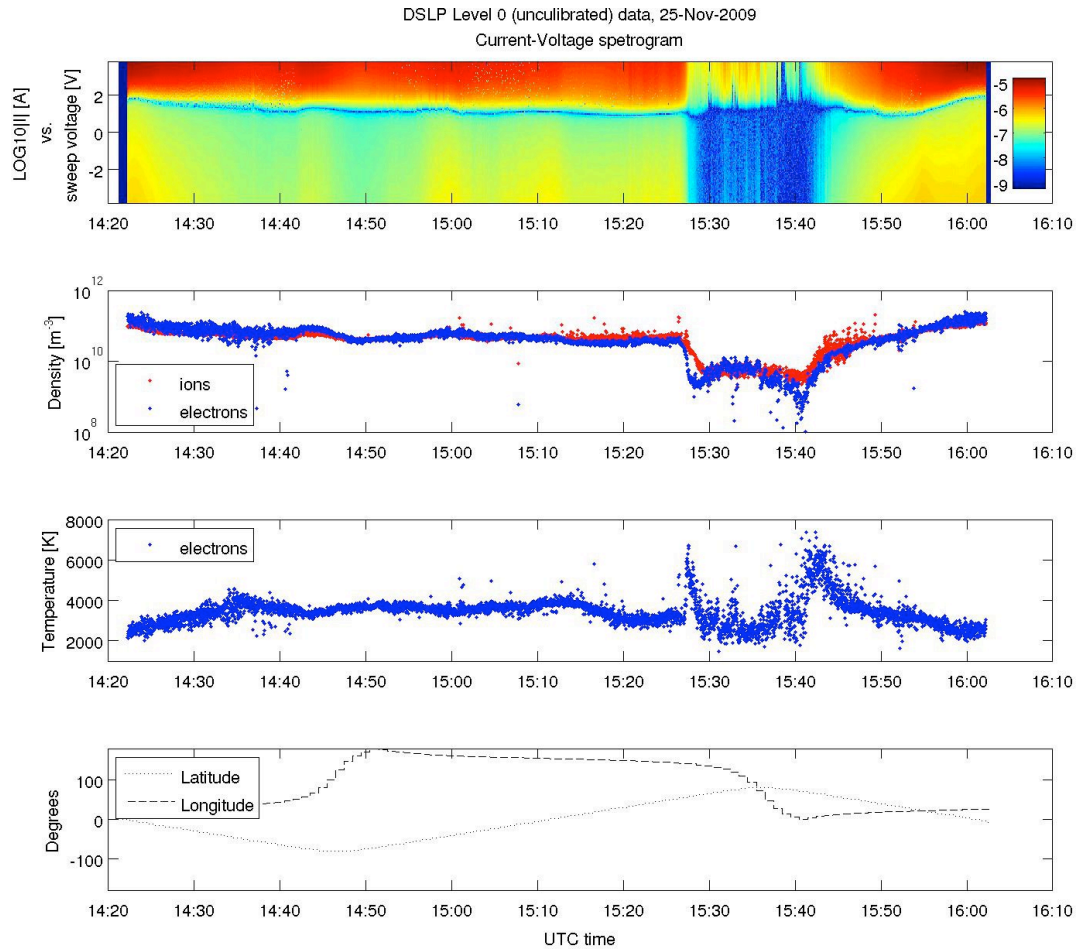


Figuur 30: Het allereerste beeld dat genomen werd met de SAP telescoop op 14 december toonde slechts een deel van de zonneschijf. Rechts wordt een foto van de Zon getoond die SWAP nam nadat men de positie van de satelliet al meer onder controle had.

4.2.8 The Dual Segmented Langmuir Probe (DSLP)

De DSLP is een sonde die het achtergrondplasma in de magnetosfeer zal bestuderen. Hiervoor maakt men, op een tijdsschaal van 1 seconde, metingen van de dichtheid van het ruimteplasma in het bereik van 100 tot 5×10^6 deeltjes/cm³, de elektronentemperatuur tussen 500 en 3000 K en de potentiaal van het ruimtetuig tussen -5V en +5V.

Het instrument werd ontwikkeld door het Institute of Atmospheric Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic in Praag en bestaat uit 2 Langmuir sondes. Het is een verbeterde versie van de Langmuir sondes aan boord van de Franse DEMETER satelliet die in 2004 gelanceerd werd. De dichtheid en de temperatuur van het plasma worden afgeleid van de I-V curve (stroomdichtheid in functie van potentiaalverschil) van de Langmuir sonde.



Figuur 31: De eerste resultaten van het DSLP instrument toonden aan dat het in goede conditie verkeert. Uit de ruwe metingen worden dichtheden en temperaturen afgeleid.

4.2.8.1 The Thermal Plasma Measurement Unit (TPMU)

De TPMU is een wetenschappelijk instrument waarmee men de plasmaparameters wil bepalen die cruciaal zijn voor de voortplanting van de elektromagnetische golven in de bovenste lagen van de ionosfeer. Het toestel bestaat uit een detectie-eenheid met de sondes en hun versterkers en een eenheid die instaat voor de verwerking van de metingen. Met de TPMU zal men de totale ionendichtheid en de elektrontemperatuur meten. Ook de samenstellingen van de ionen en hun temperatuur worden bepaald, net als de potentiaal van de satelliet in zijn geheel.

Het gezichtsveld van de TPMU-sensoren ligt in de lijn van de vliegrichting van de satelliet, voor zover dat mogelijk is door de zongerichte positie van het ruimtetuig.

TPMU werd ontwikkeld door een Tsjechisch consortium, geleid door het Institute of Atmospheric Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic in Praag.



Figuur 32: Zijaanzicht van de PROBA2 satelliet. Aan de linkerkant zijn de twee sondes van het DSLP-instrument te zien. De twee cirkels op het middenpaneel zijn onderdeel van TPMU.

4.3 SMOS

De *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) missie is de tweede *Earth Explorer* van ESA die in 2009 wordt gelanceerd, na GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer). De *Earth Explorers* zijn een reeks van satellieten voor aardobservatie die als doel hebben onze kennis van de Aarde te verbeteren en de invloed van menselijke activiteiten te bestuderen.

SMOS wordt ook de ‘watermissie’ van ESA genoemd. Om ons begrip van de watercyclus op aarde te verbeteren zal de satelliet observaties maken van de grondvochtigheid en van het zoutgehalte van het wateroppervlak van de oceanen.

Deze gegevens zijn belangrijk om modellen van het weer en het klimaat op te stellen, voor waterbeheer, landbouw en het voorspellen van overstromingen.

SMOS heeft slechts één instrument aan boord, de L-band radiometer MIRAS. Dit instrument detecteert vocht in de ondergrond en zout in water door gebruik te maken van de verschillende elektromagnetische eigenschappen van vloeibaar water en droge grond en van puur water en zout water. Hiervoor gebruikt men microgolfstraling. Deze straling heeft een lange golflengte en vereist dus een grote antenne om de straling te kunnen opvangen, wat een uitdaging is voor een satelliet in de ruimte. Net als radio-astronomen op Aarde, die verschillende kleine telescopen combineren tot één grote antenne, maakt de SMOS satelliet gebruik van interferometrie door 69 kleine telescopen op 3 armen in een ‘Y’-vorm te plaatsen en zo te combineren tot één grote antenne.



Figuur 32: De SMOS satelliet

5 Verklarende woordenlijst – Lexicon

ACE – Advanced Composition Explorer satelliet die de zonnwind in het oog houdt.

Aurora – Gekleurd licht dat zichtbaar is in de atmosfeer, veroorzaakt door botsingen tussen geladen deeltjes van de magnetosfeer van een planeet en atmosferische gassen in de buurt van de magnetische polen van die planeet. Aurora's zijn zichtbaar op Aarde als de aurora borealis, of het noorderlicht, en de aurora australis, het zuiderlicht.

Chromosfeer – Een 2500 km dikke laag van plasma boven de fotosfeer van de Zon. De temperatuur varieert er tussen 4 500 en 60 000 K.

Convectie – De beweging van materie ten gevolge van veranderingen in de temperatuur en dichtheid. Heet materiaal stijgt omdat het een lagere dichtheid heeft (en dus lichter is) en koude materie daalt omwille van een hogere dichtheid (zwaarder).

Convectieve zone – De Zon bestaat uit verschillende lagen. Vanaf het centrum naar de buitenkant toe vind je achtereenvolgens de kern, de convectieve zone, de radiatieve zone, de fotosfeer, de chromosfeer en de corona. De convectieve zone strekt zich uit van juist onder de fotosfeer tot aan de radiatieve zone. In dit gebied transporteren convectieve stromen de energie van de kern van de Zon naar de oppervlakte.

Corona – De buitenste laag van de atmosfeer van de Zon. Deze ionenwolk strekt zich uit over miljoenen kilometers en bestaat uit een gas dat veel ijler is dan de atmosfeer van de Aarde. De temperatuur is er groter dan een miljoen Kelvin. De corona is met het blote oog enkel zichtbaar tijdens een zonsverduistering.

Coronaal gat – Een gebied in de corona dat er donker uitziet in het ultraviolette licht. Coronale gaten zijn meestal gelokaliseerd rond de polen van de Zon, maar kunnen ook op lagere breedtegraden voorkomen. De magnetische veldlijnen in een coronaal gat waaieren uit tot in de zonnwind in plaats van terug te keren naar het zonsoppervlak. Omdat de magnetische veldlijnen tot in de ruimte reiken, dragen ze heet materiaal met zich mee en koelen zo regio's op het zonsoppervlak af.

Coronale massa-ejectie (CME) – Een expansie van een deel van het coronale magnetische veld die een enorme bel van plasma en magnetisch veld doet uitbarsten vanop de Zon. Een CME kan verschillende uren duren en reist door de ruimte aan een snelheid van een miljoen kilometer per uur. CME's worden meestal vergezeld van een zonnevlam. De geladen deeltjes en magnetische velden geassocieerd met een CME kunnen storingen opwekken in de stroomvoorziening en communicatie, schade toebrengen aan satellieten en gezondheidsproblemen voor astronauten veroorzaken. Meestal duurt het zo'n drie dagen voor ze de Aarde bereiken, maar heel snelle CME's kunnen aankomen in minder dan een dag.

Coronograaf – Een instrument dat ontworpen is om de corona te bestuderen door het licht van de Zon af te dekken met een schijf. Dit instrument creëert een artificiële zonsverduistering die ons toelaat om de ijle buitenste atmosfeer van de Zon te zien. Elk van de STEREO satellieten heeft twee coronografen aan boord.

Elektromagnetisch spectrum – Het volledige bereik van golflengtes en elektromagnetische energie, dit is (van korte golflengtes naar lange) gammastraling, X-stralen, ultraviolet licht, zichtbaar licht, infrarood licht en radiogolven.

Elektromagnetische straling – Energie die door de ruimte beweegt met de snelheid van het licht en zich voortbeweegt door de interactie tussen elektrische en magnetische velden.

Energetische deeltjes – De atomen en molecules van een gas zijn voortdurend in beweging, waarbij ze met hoge snelheid botsen en alle beschikbare ruimte vullen. Hoe heter het gas, hoe sneller de atomen bewegen en hoe meer energie ieder van hen heeft. In een plasma gedragen de vrije ionen en elektronen zich op dezelfde manier, hoewel ze vaak meer energetisch zijn en bewegen aan een grotere fractie van de lichtsnelheid (300 000 km/s). Onderzoekers geloven dat de zeer energetische deeltjes in de zonnwind niet enkel verhit zijn, maar versneld worden door de schokgolven voor CME's en door elektrische en magnetische effecten in zonnevlammen.

Fotosfeer – Het oppervlak van de Zon, van waaruit het licht dat we daadwerkelijk zien met het menselijk oog wordt uitgezonden. De temperatuur is er gemiddeld 5800 K.

Gammastraling – Dit zijn de meest energetische golflengtes van de elektromagnetische straling die door de Zon wordt uitgezonden.

Geomagnetische storm – Een wereldwijde verstoring van het Aardse magnetische veld, veroorzaakt door zonneactiviteit. Deze stormen kunnen stroomonderbrekingen, storingen in communicatie, gezondheidsrisico's voor astronauten in de ruimte, schade aan satellieten en aurora's veroorzaken.

Golflengte – De afstand tussen opeenvolgende pieken in een golf (van licht, warmte of een andere vorm van energie). De golflengtes van het zonlicht variëren van die van radiogolven tot die van gamma straling.

Granules – Kort levend plasmacellen die door middel van convectie warmte naar het zonsoppervlak brengen.

Infrarood – Infrarood licht bestrijkt de, voor het menselijk oog onzichtbare, stralingsgolflengtes vanaf ongeveer 700 nm, net langer dan rood in het zichtbare spectrum, tot 1 mm, aan de grens van de microgolven.

Ion – Een atoom of molecule die één of meerdere elektronen gewonnen of verloren heeft en daardoor elektrisch geladen is.

Ionisatie – Het proces dat ionen creëert, typisch botsingen tussen atomen of elektronen, of door interactie met elektromagnetische straling.

Kern – De binnenste laag van de Zon, waarin energie vrijkomt door het samensmelten van kernen om zwaardere kernen te vormen (nucleaire fusie).

Magnetische lussen – Veldlijnen die verlicht worden door heet plasma dat langsheen de magnetische veldlijnen stroomt.

Magnetisme – Een kracht die wordt gegenereerd door elektrische stromen en veranderende elektrische velden. Magnetisme is verantwoordelijk voor zowat iedere gebeurtenis in de atmosfeer van de Zon, van zonnevlekken tot CME's en zonnevlammen.

Maunder minimum – Van 1645 tot 1715 was er volgens wetenschappers een vermindering in de totale energieproductie van de Zon, wat wordt aangegeven door de afwezigheid van zonnevlekken. Deze periode viel samen met een periode in het klimaat op Aarde die gekend staat als de kleine ijstijd.

Plasma – Een plasma bestaat uit materie waarvan de atomen elektronen hebben verloren en die een mengeling wordt van ionen en elektronen. De Zon bestaat uit plasma dat werd gecreëerd door hoge temperaturen. Bliksem en fluorescerend licht zijn vormen van thermische plasma's op Aarde. Omdat een plasma gedomineerd wordt door geladen deeltjes, interageert het sterk met elektrische en magnetische velden. Plasma wordt vaak gezien als de vierde toestand van de materie (naast vast, vloeibaar en gas) aangezien het grootste deel van de materie in de ruimte een plasma is.

Protuberans – Een structuur in de corona bestaande uit koel plasma dat vastgehouden wordt door magnetische veldlijnen. In zichtbaar licht zien we een protuberans als een heldere structuur over de zonnerand, maar ze lijkt donker gezien tegen de heldere zonnenschijf. Een protuberans kan deel gaan uitmaken van een CME.

Radiatieve zone – Een laag in de Zon tussen de kern en de convectieve zone waarin energie naar buiten toe beweegt door trage radiatie, absorptie en opnieuw uitzenden van energie door atomen die dicht op elkaar zitten.

Radiogolven – Elektromagnetische straling met een golflengte groter dan 1 mm (voorbij infrarood)

Ruimteweer – Doelt op de toestand op de Zon, in de zonnewind en in de buurt van de Aarde (magnetosfeer, ionosfeer en thermosfeer) die technologische systemen in de ruimte en op Aarde kan beïnvloeden en mensen die in de ruimte werken in gevaar kan brengen. Ongunstige omstandigheden in het ruimteweer kunnen satellietoperaties, communicatie, navigatie en elektriciteitsnetwerken verstoren.

SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) – Deze zonnesatelliet bestudeert de Zon en haar zonnewind. Belangrijke instrumenten aan boord zijn de EIT telescoop en de LASCO coronograaf.

STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory) – Deze missie bestaat uit twee bijna identieke satellieten (eentje die op de Aarde voorloopt in zijn baan, en eentje erachter) die de uitstoot van energie en materie van de Zon bestudeert en de 3D-structuur van CME's onderzoekt.

Totale zonne-irradiantie (Total solar irradiance, TSI) – De totale hoeveelheid stralingsenergie die op een oppervlak valt in een bepaalde periode.

Transitieregio – Gebied in de zonneatmosfeer met temperaturen tussen die van de chromosfeer en de corona, respectievelijk 20 000 en 1 000 000 K.

Ultraviolet – Elektromagnetische straling met een golflengte korter dan 400 nm.

Zichtbaar licht - Elektromagnetische straling met een golflengte tussen 400 en 700 nm, die gedetecteerd kan worden door het menselijke oog.

Zonnecyclus – Een bij benadering 11-jarig patroon in het aantal zonnevlekken, CME's, zonnevlammen en andere zonneactiviteit. Ongeveer iedere 11 jaar verandert het magnetische veld van de Zon van noord naar zuid en 11 jaar later dan weer terug.

Zonnefakkels – Heldere *bellen* op het zonneoppervlak die meer straling uitzenden dan de omliggende gebieden en de zonne-irradiantie doen toenemen.

Zonne-irradiantie (SSI, Solar spectral irradiance) – De hoeveelheid stralingsenergie van een bepaalde golflengte die op een oppervlak valt in een bepaalde periode.

Zonnevlam – Een snelle uitbarsting van magnetische energie in een zonnevlekkengroep, die de temperatuur in een kleine regio boven het zonsoppervlak doet toenemen met tientallen miljoenen graden. De resulterende straling golf kan communicatiesignalen verstoren en schade toebrengen aan satellieten. Zonnevlammen kunnen gevaarlijke EUV-, X-, en gammastraling en hoog-energetische protonen produceren.

Zonnevlek – Een donker gebied op de Zon, gecreëerd door sterke magnetische velden onder het zonsoppervlak. Zonnevlekken zien we donkerder omdat ze koeler zijn dan de omgevende gebieden in de fotosfeer. Ze variëren in grootte van 2400 km tot verschillende keren de grootte van de Aarde. Zonnevlekken komen meestal voor in paren of groepen van tegengestelde magnetische polariteit die roteren met het oppervlak van de Zon. Ze zijn de voetpunten van magnetische lussen die door het zonsoppervlak heen komen en het plasma beneden houden.

Zonnewind – Een plasmastroom die vanuit de Zon in alle richtingen vertrekt met erg hoge snelheden van gemiddeld 400 km/s. De zonnewind zorgt ervoor dat de starten van kometen van de Zon weg buigen en is verantwoordelijk voor de vorm van de magnetosfeer rond de planeten. De zonnewind kan ook