

Een meetstation voor whistler-golven

Fabien Darrouzet, Sylvain Ranvier en Johan De Keyser
(Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie)

WHISTLER-GOLVEN ZIJN radiogolven die zich voortplanten in een gemagnetiseerd milieu, zoals de ionosfeer en de magnetosfeer van de Aarde. Deze golven worden veroorzaakt door bliksems die zich voordoen op het andere halfrond, in de buurt van het voetpunt van de magnetische veldlijn waarop de waarnemer zich bevindt. Ze planten zich voort langsheen de magnetische veldlijnen van de Aarde. De karakteristieken van deze golven laten toe om informatie in te winnen over het milieu waar ze doorheen reizen. Whistler-golven kan men bestuderen door middel van satellieten in de ruimte, maar eveneens vanop de begane grond. Ruim een jaar geleden heeft het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie een antenne geïnstalleerd voor radiogolven van zeer lage frequenties (very low frequency, VLF, 3-30 kHz) om 'whistlers' te detecteren. De antenne werd ingeplant op de site van de Koninklijke Sterrenwacht te Humain en functioneert sinds de lente van 2011. In dit artikel stellen we enkele eerste interessante resultaten voor.

De magnetosfeer van de Aarde

De Aarde is een planeet met een krachtig intern opgewekt magneetveld. Dit magneetveld kan in eerste benadering aanzien worden als een magnetische dipool, met een as die ongeveer 12° afwijkt van de rotatie-as. De interplanetaire omgeving waarin de Aarde zich bevindt, bestaat uit een constante stroom elektrisch geladen deeltjes afkomstig van de Zon. Deze 'zonnwind', zo genoemd door E.

Parker in 1958, is heel ijl (~ 5 deeltjes/cm³ op 1 AE) maar zeer snel (400 tot 800 km/s) [1]. De zonnwind bestaat vooral uit elektronen en protonen, met een kleine hoeveelheid heliumkernen en sporen van zwaardere ionen. Deze zonnwind vervormt het magneetveld rond de Aarde en creëert de 'magnetosfeer', voor het eerst zo genoemd door T. Gold in 1959 [2]. Onder invloed van de zonnwind en het interplanetair magnetisch veld dat daarin vervat zit, wordt de magnetosfeer aan de dagzijde samengedrukt (tot op een tiental aardstralen, $1 R_E = 6371$ km) en erg uitgerokken aan de nachtzijde (honderden aardstralen).

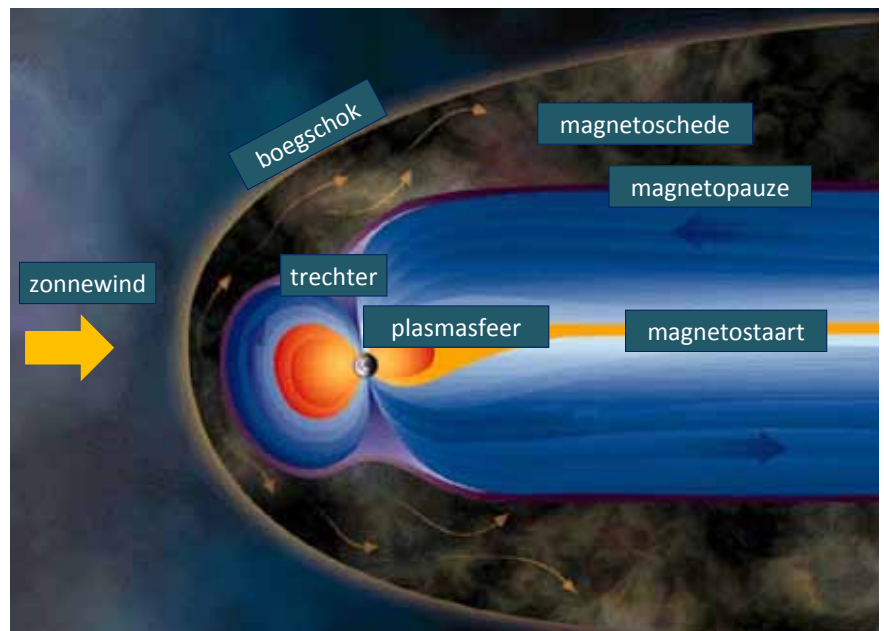
De magnetosfeer wordt schematisch voorgesteld in figuur 1. Aan de buitentzijde bevindt zich de magnetosche-

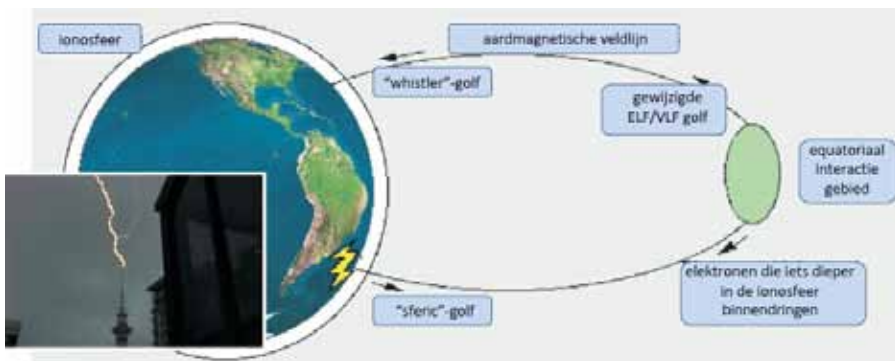
de, die van de magnetosfeer gescheiden wordt door de magnetopauze. Tussen de zonnwind en de magnetoschede vindt men de boegschok (waar de zonnwind subsoon wordt en via de magnetoschede omheen de magnetosfeer stroomt). De benedengrens van de magnetosfeer is de ionosfeer. Er zijn allerlei bijzondere deelgebieden te onderscheiden binnen de magnetosfeer, sommige gevuld met materiaal afkomstig van de zonnwind, andere gevuld met gas van ionosferische oorsprong. De evolutie van de magnetosfeer wordt gecontroleerd door de interactie tussen de zonnwind en het aardmagnetisch veld.

Whistler-golven

Er vormen zich op natuurlijke wijze allerlei types elektromagnetische gol-

Figuur 1. Magnetosfeer van de Aarde met de belangrijkste deelgebieden. Figuur: ESA.





Figuur 2. Schematische voorstelling van de opwekking en voortplanting van whistler-golven.

ven in de magnetosfeer en in de ionosfeer. Bovendien kunnen die golven zich voortplanten in dergelijke gemagnetiseerde media. We focussen hier op 'fluit'-golven of 'whistlers'. Het bestaan van deze golven werd voor het eerst aangetoond door Barkhausen in 1918. De oorsprong ervan werd voor het eerst verklaard door Storey in 1953. Hij toonde aan dat whistlers ontstaan bij bliksem [3]. Gedurende een onweer creëert een bliksem een elektrische impuls die zich vervolgens langsheen de aardmagnetische veldlijnen voortplant, eerst door de ionosfeer, dan doorheen de magnetosfeer, en tenslotte doorheen de ionosfeer in de tegenoverliggende hemisfeer (fi-

guur 2). De term 'fluit'-golf verwijst naar het feit dat de transpositie van het signaal naar het audiogebied een typische fluittoon produceert, met een frequentie die progressief daalt. Deze whistler-golven hebben frequenties van enkele kilohertz. Ze hebben bijzondere voortplantingskenmerken die afhangen van het medium waar ze doorheen reizen. De propagatiesnelheid hangt namelijk af van de dichtheid van het plasma langsheen het traject. Indien men de frequentie-verandering opmeet, dan kan men daaruit de plasmadichtheid in de magnetosfeer afleiden, en dan vooral in de plasmasfeer, een gebied dat gekenmerkt wordt door gesloten magne-

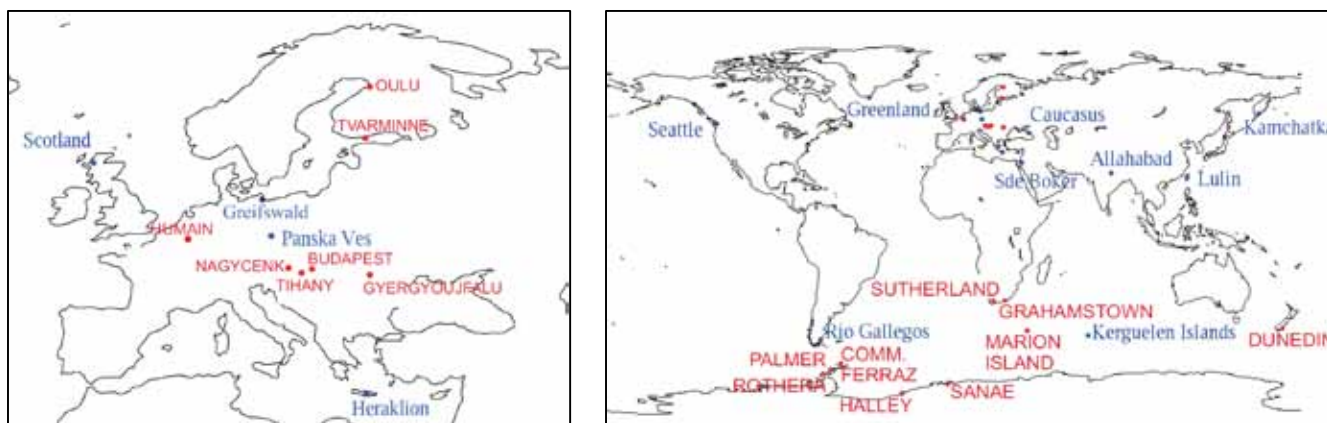
tische veldlijnen [4].

Het is belangrijk om regelmatig informatie te verzamelen over deze golven omdat dit ons toelaat de omgeving van de Aarde in de gaten te houden. Whistler-golven kunnen waargenomen worden in de ruimte, maar het is evenzeer mogelijk om ze te beluisteren met een antenne op het aardoppervlak. De eerste statistische studies van whistler-waarnemingen op gematigde breedte werden gedaan in de jaren 1970 te Tihany in Hongarije [5]. Deze toonden aan dat er een piek is in het voorkomen van whistlers in maart en april, tussen 15^h en 03^h plaatselijke tijd. Een andere studie werd uitgevoerd op dezelfde plaats tussen 2002 en 2008, en toonde kleine verschillen: de piek vond plaats tussen februari en april tussen 16^h en 02^h plaatselijke tijd [6]. Deze eerste studies bewezen de relevantie van dit soort metingen. Meteen werd ook duidelijk dat dit soort metingen uitgebreid moest worden naar andere plekken verspreid over de Aarde; op die manier ontstond het AWDAnet meetnetwerk. Een andere studie betrof meetgegevens verzameld te Rothera in Antarctica. Deze studie onderzocht het verband tussen whistlers en bliksems: het bleek dat de bron van de



Figuur 3. De VLF antenne in Humain, met een 12 meter hoge mast.





Figuur 4. Verspreiding van AWDAnet antennes in Europa (links) en elders in de wereld (rechts). De stations in het rood zijn momenteel operationeel, die in het blauw zijn in ontwikkeling. Figuur: J. Lichtenberger.

whistlers zich inderdaad dicht bij het magnetisch toegevoegde punt bevond, dit wil zeggen dicht bij het voetpunt van de magnetische veldlijn in de tegenoverliggende hemisfeer [7].

Project op het BIRA

Na een eerste contact met J. Lichtenberger (Space Research Group, Eötvös University, Hongarije) gedurende een wetenschappelijke conferentie in november 2009, ondernam het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie (BIRA-IASB) een haalbaarheidsstudie om in België een ontvangst-antenne voor whistlers te installeren in het domein van de zeer lage frequenties (very low frequency, VLF, 3-30 kHz).

De site van Humain (breedte $\sim 50.11^\circ\text{NB}$, lengte $\sim 5.15^\circ\text{OL}$), die toebehoort aan de Koninklijke Sterrenwacht van België (ORB-KSB), werd al snel uitgekozen om logistieke redenen. Er werden testmetingen uitgevoerd in mei 2010 om te verifiëren of er weinig elektromagnetische pollutie was op die site in het betrokken frequentiegebied. De resultaten van deze testen waren erg positief. De site van Humain werd daarom definitief geselecteerd, uiteraard ook dankzij de goedkeuring van de Sterrenwacht.

De antenne bestaat uit twee magnetische lussen in onderling loodrechte vlakken, volgens noord-zuid respectievelijk oost-west oriëntatie. Deze lussen werden geïnstalleerd op een mast van 12 m hoogte. Ze hebben elk een

oppervlak van 50 m^2 (figuur 3). Het geheel werd geplaatst in november 2010 en het elektronisch materiaal (ontvanger en registratieapparatuur) in de lente van 2011. De eerste metingen werden uitgevoerd in april 2011.

Dit project maakt deel uit van de verdere uitbouw van het AWDAnet netwerk (Automatic Whistler Detector and Analyzer system's network) onder leiding van J. Lichtenberger [6]. Dit netwerk omvat momenteel 7 antennes in Europa (4 bijkomende antennes zijn nog in ontwikkeling) en 9 antennes elders in de wereld (9 bijkomende antennes in ontwikkeling). Dit netwerk streeft enerzijds een goede geografische verdeling na en anderzijds probeert men ook antennes op magnetisch toegevoegde locaties te plaatsen. De geografische spreiding van de antennes wordt getoond in figuur 4.

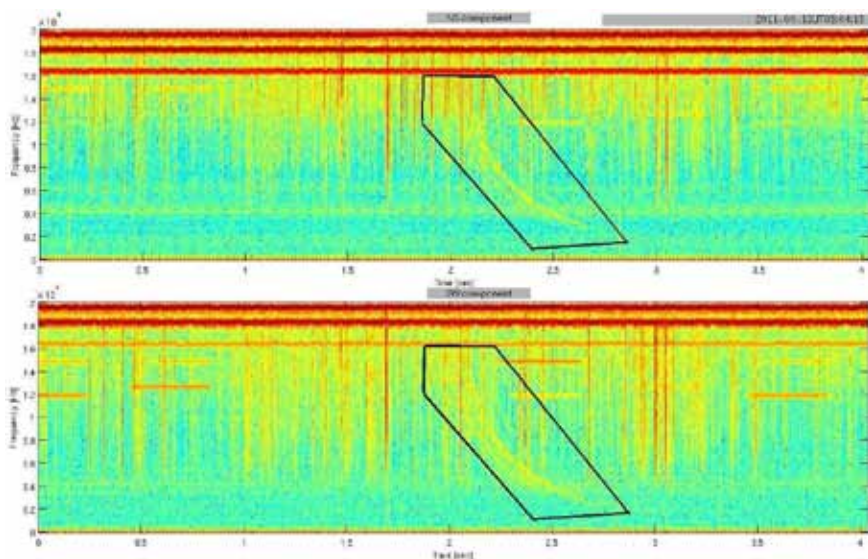
Deze whistler-metingen kunnen ons helpen om de plasmadichtheid in de plasmasfeer te bepalen. We kunnen de metingen van verschillende AWDAnet antennes onderling vergelijken, maar eveneens kunnen we het verband proberen te leggen met gegevens bekomen aan boord van satellieten (zoals bijvoorbeeld ESA/Cluster) en we kunnen de gegevens ook integreren in numerieke modellen.

Eerste resultaten

De eerste bruikbare metingen werden uitgevoerd in april 2011. Een pro-

gramma dat wordt uitgevoerd door de computer voor gegevensregistratie maakt reeds een eerste automatische selectie van de gegevens om whistler-signalen (of soms signalen die er enigszins op lijken) te identificeren [8,9]. Een tweede manuele selectie wordt daarna uitgevoerd om enkel de echte whistlers te weerhouden. Op die manier verzamelen we spectrogrammen die de intensiteit van de radiogolven in functie van tijd en frequentie weergeven (10 seconden; 0-20 kHz). Het gaat hier om gemeten fluctuaties in het magnetisch veld, zoals getoond in figuur 5, met de noord-zuid component in het bovenste deel van de figuur en de oost-west component in het onderste deel.

Op dergelijke spectrogrammen zijn talrijke emissies te zien. Zo zijn er een aantal emissies bij constante frequentie (bijvoorbeeld bij 16, 18 en 20 kHz), te wijten aan parasitaire bronnen of eventueel militaire zenders. Andere emissies duren minder dan 1 seconde maar worden zeer regelmatig waargenomen bij hogere frequenties (rond 12 en 15 kHz bijvoorbeeld). Daarnaast zijn er ook uiterst korte breedband emissies. Temidden van al die verscheidenheid valt een whistler echter heel duidelijk op, in de beide magnetische componenten: Het gaat om de emissie met het gekromde tijd-frequentie patroon tussen 2 en 3 seconden na de start van het spectrogram. Een gedetailleerde analyse van deze whistler en van 2 andere laat ons toe om de volgende conclusies te



Figuur 5. Tijd-frequentie spectrogrammen bekomen te Humain op 12 april 2011 om 03^h04^m13^s UT (boven de noord-zuid component, onder de oost-west component). De zwarte contour duidt een typische whistler aan.

trekken:

- Radiële afstand van de magnetische veldlijn in het evenaarsvlak [R_E]:
2.32 2.18 2.41
- Dichtheid in het evenaarsvlak [cm^3]:
2471 2703 2456
- Gyratiefrequentie in het evenaarsvlak [kHz]:
69.85 83.90 62.08

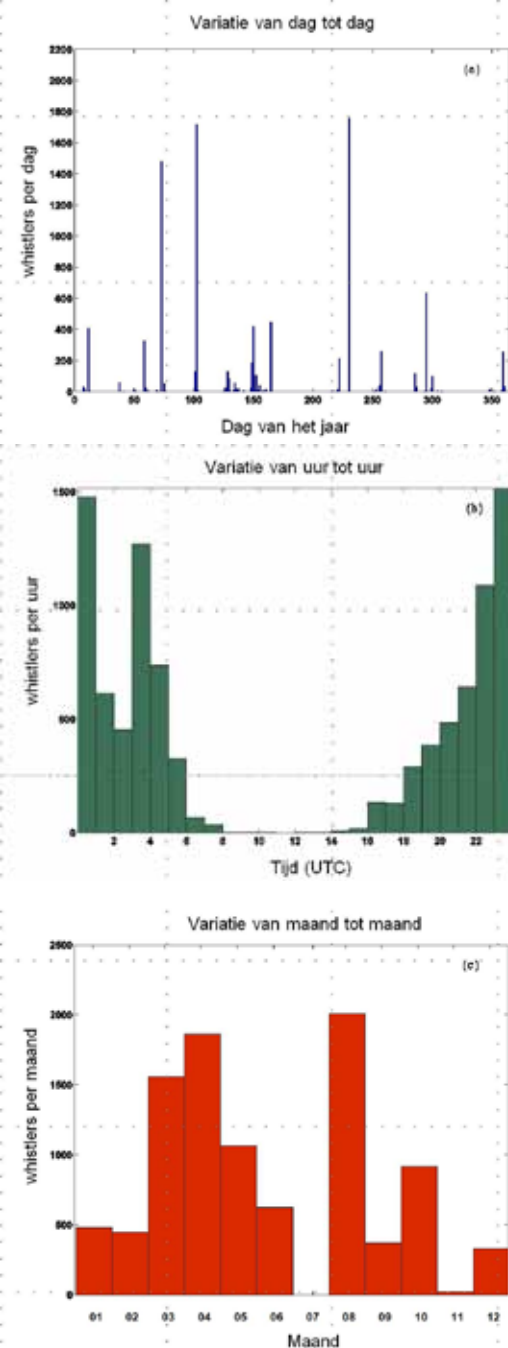
Een statistische analyse over een klein jaar metingen (8 april 2011 tot 17 maart 2012) laat ons toe enkele conclusies te trekken (figuur 6). We moeten wel opmerken dat het instrument niet al die tijd gefunctioneerd heeft omwille van diverse technische problemen (die vooral te maken hadden met de automatische gegevensregistratie). Zo hebben we geen metingen tussen 15 april en 5 mei 2011, tussen 16 juni en 31 juli 2011, gedurende 1 week eind september, tussen 8 en 23 november en gedurende 1 week begin december. Globaal gezien is het aantal waargenomen whistlers wat lager dan in gelijkaardige stations (bijvoorbeeld Tihany in Hongarije [6]). Dat kan verklaard worden door de periodes waarop het instrument niet werkte, maar ook door het feit dat onze antenne wat kleiner is. De onweersactiviteit in de buurt van het magnetisch toegevoegde punt zou ook onderzocht moeten worden. De whistlers worden vooral 's

nachts waargenomen, tussen 22^h en 01^h UT, wat overeenkomt met vroegere resultaten [5,6]. Een minimum wordt waargenomen tussen 01^h en 03^h UT. De activiteit is hoog in de lente (maart en april) wat logisch is omwille van de onweersactiviteit op het zuidelijke halfrond. Het is echter verwonderlijk om te zien dat er bijzonder veel whistlers werden waargenomen in augustus, een periode die normaal gezien eerder kalm zou moeten zijn. Een verdere analyse zal de oorzaak hiervan moeten ophelderen.

Besluit

Het Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie heeft voor het eerst een Belgisch waarnemingsstation gebouwd voor de studie van elektromagnetische golven in het gebied van de erg lage frequenties (VLF) om daarmee whistler-golven te onderzoeken. De antenne bevindt zich te Humain en verzamelt gegevens sinds het voorjaar van 2011. De gegevens blijken van goede kwaliteit te zijn. Meer informatie kan gevonden worden op de website van het project: <http://lawda.aeronomie.be>.

Het is natuurlijk de bedoeling om dit meetstation in te schakelen in een globaal netwerk (AWDAnet). Dit moet ons toelaten om meer Belgische



Figuur 6. Statistische analyse van de whistler-golven waargenomen te Humain tussen 8 april 2011 en 17 maart 2012: (boven) variatie van dag tot dag; (midden) variatie van uur tot uur; (onder) seizoensgebonden variatie.

expertise op te bouwen in dit domein [6].

Het BIRA-IASB staat traditioneel sterk in de studie van de plasmasfeer. In de voorbije jaren deden we veel onderzoek met behulp van de

ESA/Cluster satelliet in dit verband [10]. Metingen vanaf de grond door de AWDAnet meetstations vormen voor ons een nieuwe, complementaire bron van informatie.

Dankwoord

Wij zijn J. Lichtenberger en C. Ferencz erkentelijk voor hun hulp bij het opzetten en uitvoeren van dit project. Dit project werd gerealiseerd dankzij de financiële steun van het Federaal Wetenschapsbeleid (BELSPO, Prodex Cluster) en het Expertisecentrum voor Zon-Aarde-relaties (Solar-Terrestrial Centre of Excellence) te Ukkel.

Referenties

- [1] Parker, E. N., Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields, *Astrophys. J.*, 128, 664, 1958.
- [2] Gold, T., Plasma and Magnetic Fields in the Solar System, *J. Geophys. Res.*, 64(11), 1665-1674, 1959.
- [3] Storey, L. R. O., An Investigation of Whistling Atmospherics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 246(908), 113-141, 1953.
- [4] Park, C. G., Methods to determine electron concentrations in the magnetosphere from nose whistlers, Tech. Rep. 3454-1, Radiosci. Lab., Stanford Electron. Lab., Stanford Univ., Stanford, Calif., 1972.
- [5] Tarcsai, G., P. Szemerédy, and L. Hegyemegi, Average electron density profiles in the plasmasphere between $L = 1.4$ and 3.2 deduced from whistlers, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 50(7), 607-611, doi:10.1016/0021-9169(88)90058-X, 1988.
- [6] Lichtenberger, J., C. Ferencz, L. Bodnar, D. Hamar, and P. Steinbach, Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Automatic Whistler Detector, *J. Geophys. Res.*, 113, A12201, doi:10.1029/2008JA013467, 2008.
- [7] Collier, A. B., J. Lichtenberger, M. A. Clilverd, C. J. Rodger, and P. Steinbach, Source region for whistlers detected at Rothera, Antarctica, *J. Geophys. Res.*, 116, A03219, doi:10.1029/2010JA016197, 2011.
- [8] Lichtenberger, J., A new whistler inversion method, *J. Geophys. Res.*, 114, A07222, doi:10.1029/2008JA013799, 2009.
- [9] Lichtenberger, J., C. Ferencz, D. Hamar, P. Steinbach, C. J. Rodger, M. A. Clilverd, and A. B. Collier, Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Implementation of the analyzer algorithm, *J. Geophys. Res.*, 115, A12214, doi:10.1029/2010JA015931, 2010.
- [10] Darrouzet, F., De Keyser, J., and Pierrard, V. (Eds.), *The Earth's Plasmasphere: A CLUSTER and IMAGE Perspective*, Springer, 296 p., ISBN 978-1-4419-1322-7, 2009.