

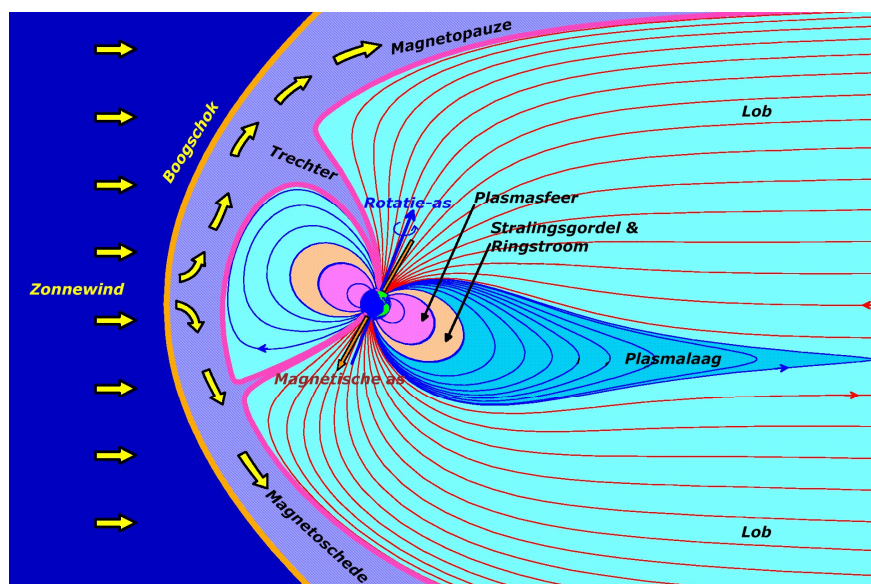
Installatie van een magnetische antenne op de Prinses Elisabethbasis in Antarctica om natuurlijke radiogolven te detecteren

Fabien Darrouzet, Johan De Keyser en Phebe De Keyser
(Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie)

TIJDENS DE LAATSTE campagne op de Belgische Prinses Elisabethbasis in Antarctica in januari-februari 2016, werd er een magnetische antenne geïnstalleerd met als doel het detecteren van whistlers, natuurlijke radiogolven met een zeer lage frequentie (3-30 kHz). Vertrekkend van de metingen door dit instrument is het mogelijk informatie te bekomen over de toestand van de aardse plasmasfeer, een deelgebied van de aardse magnetosfeer. Deze informatie is belangrijk voor het bestuderen van de interactie van de plasmasfeer met de Van Allen-stralingsgordels. Deze gordels bevatten deeltjes met een zeer hoge energie die gevaarlijk zijn voor commerciële of wetenschappelijke satellieten in deze zone en eveneens voor astronauten die een ruimtewandeling maken.

Magnetosfeer – Plasmasfeer

De aardse magnetosfeer is het gebied binnen de invloedssfeer van het magnetische veld van de Aarde. Deze magnetosfeer wordt sterk beïnvloed door de zonnewind. De magnetosfeer strekt zich uit tot een tiental aardstralen ver ($1 R_E = 6371$ km) in de richting van de Zon, terwijl ze langs de andere kant van de Aarde uitgetrokken is tot een magnetische staart van honderden aardstralen lang. De buitengrens van de magnetosfeer is de magnetopauze,



Figuur 1. De aardse magnetosfeer en deelgebieden, inclusief de plasmasfeer. Aangepast van de blog <http://l-unite.ning.com/> door Geunes.

en net daarbuiten bevindt zich de magnetoschede. Tussen de supersoon toestromende zonnewind en de magnetoschede ontstaat een schokgolf. Binnen in de magnetosfeer bevinden zich talrijke subregio's, zoals de pooltrechters, de stralingsgordels, de ringstroom, de plasmalaag, de lobben van de staart, en de plasmasfeer (figuur 1). De plasmasfeer heeft een toroidale vorm en bevat elektronen en ionen (90% H^+) voornamelijk afkomstig uit de ionosfeer, de bovenste laag van de atmosfeer. De plasmasfeer strekt zich ge-

middeld uit tot op $4-5 R_E$ ver van de Aarde. Het is een zeer dynamisch gebied en zijn eigenschappen variëren in functie van de geomagnetische activiteit. Zo kan de buitengrens ervan, de plasmapauze, zich in het geval van een sterke verhoging van deze activiteit situeren op $2 R_E$. In lange periodes van lage geomagnetische activiteit daarentegen, kan de grens zich uitstrekken tot $7-8 R_E$. Zulke variaties in activiteit verstoren eveneens de structuur op kleine en middelgrote schaal binnenin de plasmasfeer.

Whistlers

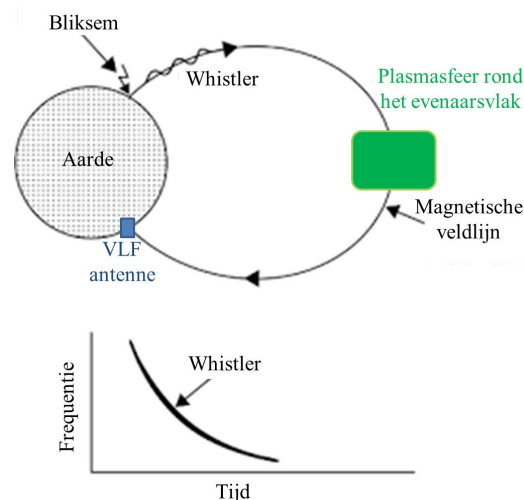
Het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie bestudeert al sinds vele jaren de plasmasfeer met behulp van wetenschappelijke satellieten (bijvoorbeeld de 4 van de Europese missie Cluster) en met behulp van numerieke modellen. Enkele jaren geleden werd beslist om ook onderzoek te doen met behulp van metingen uitgevoerd vanop het aardoppervlak – daarbij is men niet afhankelijk van het al dan niet doorgaan van dure ruimte-missies. De plasmasfeer zelf werd ontdekt in de jaren 1960 door Don Carpenter (Stanford University) via metingen vanop de grond van elektromagnetische golven met een zeer lage frequentie (VLF: very low frequency). Deze golven werden in dezelfde periode waargenomen met de eerste Russische satellieten door Gringauz. Ze worden whistlers genoemd en worden gedetecteerd tussen de 5 en de 20 kHz (afhankelijk van de magnetische breedte van de waarnemer), juist in het midden van de lage frequentie-band. Ze worden gecreëerd door bliksems, die energie uitstralen in de vorm van elektromagnetische golven met een brede reeks van frequenties. Een deel van deze golven spreidt zich verticaal uit in de atmosfeer, doorkruist de ionosfeer en wordt vervolgens langsheen de lijnen van het aardmagnetisch

veld door de magnetosfeer geleid van het ene halfrond naar het andere. Vervolgens worden ze gedetecteerd door een daartoe bestemd instrument op Aarde (zie bovenaan figuur 2). De golven met een hogere frequentie planten zich sneller voort dan die met een lage frequentie en worden dus het eerst waargenomen, zoals aangeduid om het onderste deel van figuur 2. Het resultaat is een toon met een dalende frequentie die lijkt op gefluit, vandaar hun naam. De whistlers kunnen zich ook horizontaal verspreiden in de aardse ionosfeer, die dan werkt als een golfgeleider. Een gedetailleerde analyse van deze golven laat toe de dichtheid van elektronen in de plasmasfeer te bepalen.

Meetinstrument

Eerst werd er een meetinstrument geïnstalleerd tijdens de winter van 2010-2011 in Humain (provincie Luxemburg) met een ander meetsysteem. De antenne bestond hier uit twee loodrechte magnetische lussen, noord-zuid en oost-west georiënteerd, bevestigd aan een 12 meter hoge mast om op die manier een oppervlakte van 50 m² te bekomen voor elke lus (figuur 3). Deze antenne werkt goed sinds augustus 2011 (zie *Heelal* juli 2012, blz.222). De metingen worden echter verstoord door elektromagneti-

Figuur 3. Magnetische antenne geïnstalleerd in Humain in België tijdens de winter van 2010-2011. Een meethut met de datalogger en de computers bevindt zich rechts. Foto: Darrouzet.



Figuur 2. Schema ter illustratie van de vorming van een whistler (bovenaan) en zijn vorm in een tijd-frequentie voorstelling (beneden). Aangepast van de website <http://theastronomist.fieldofscience.com/> door Darrouzet.

sche stralen afkomstig van menselijke activiteit, die het instrument gemakkelijk opvangt. Daarom werd het plan opgevat om een tweede meetinstrument te installeren, dit keer op de Belgische Prinses Elisabethbasis in Antarctica. Het voordeel is dat daar weinig versturende elektromagnetische golven zijn in vergelijking met de industriële en bewoonde streken in de rest van de wereld. Bovendien is de magnetische locatie van de basis (71°57' zuiderbreedte) zeer interessant. De magnetische veldlijn waarop de basis ligt, vormt een lus (zoals te zien

Figuur 4. Plastiëne doos met het meetinstrument. De twee magnetische spoelen zijn loodrecht op elkaar gepositioneerd, in de noord-zuid en oost-west richting. Foto: Darrouzet.



in figuur 2) met een radiale afstand tot de evenaar van $5.5 R_E$. Dat laat in principe toe om de dynamische veranderingen van de grootte van de plasmasfeer te monitoren. Omdat het instrument moet kunnen werken onder moeilijke omstandigheden wordt gebruikgemaakt van een compacte magnetische antenne: twee magnetische spoelen geplaatst in een hermetisch afgesloten plasticen doos, die op zijn beurt in een houten, thermisch geïsoleerde doos zit, vastgemaakt op een houten tafel (figuur 4). De spoelen bevatten een geïntegreerde voorversterker en het geheel is verbonden aan een datalogger op ongeveer 500 meter van het instrument. Deze datalogger digitaliseert en verzendt de data via twee computers, die al een eerste analyse uitvoeren om de whistlers te selecteren en er de overeenkomstige plasmasferische dichtheden uit af te leiden met behulp van een inversietechniek.

Installatie van het instrument

Na een voorbereidingsperiode van meerdere maanden om de haalbaarheid van het project te bekijken, een financiering te vinden, materiaal te kopen en na te denken over de locatie, vertrok een wetenschapper van het BIRA, vergezeld door een Hongaarse collega, op expeditie naar de Prinses Elisabethbasis in de periode van 8 januari tot 11 februari 2016 (tijdens het zomerseizoen op Antarctica; de basis is onbewoond in de winter) om het instrument en het bijbehorend analysesysteem te installeren. Deze installatie gebeurde in meerdere fasen: eerst metingen uitvoeren met een draagbaar toestel om de beste locatie te vinden om de antenne te plaatsen (figuur 5), het instrument installeren en het via kabels verbinden met een beschutmeethokje voor de datalogger en met de basis, vervolgens testen van het instrument en uiteindelijk de installatie afwerken, gebaseerd op het resultaat van deze testen.

De eerste metingen wezen uit dat de antenne best geplaatst werd op ongeveer 500 meter ten oosten van het noordelijke meethok, dat zelf op ongeveer 300 meter ten noorden van de

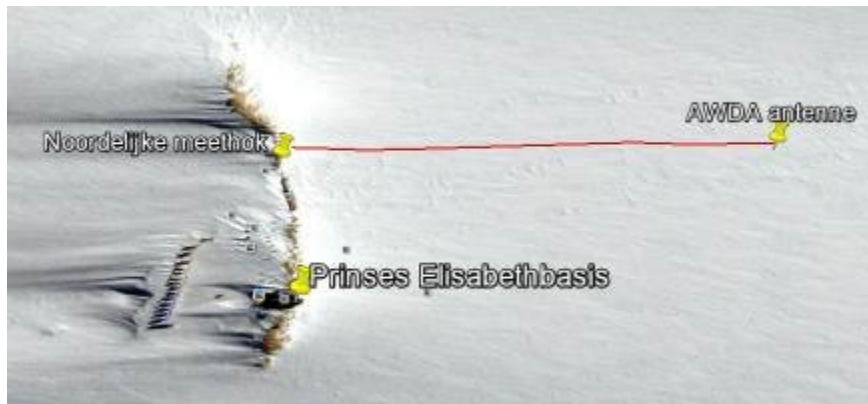


Figuur 5. Testen met behulp van een draagbaar instrument om de beste locatie te vinden om de antennes te plaatsen. Foto: *Lichtenberger*.

basis staat (figuur 6). Op die manier is de antenne ver genoeg van de basis opdat het niet verstoord wordt door elektromagnetische emissies, maar ook weer niet té ver om niet te veel signaal te verliezen in te lange kabels. Een houten tafel werd vervolgens gebouwd om daarop de bovengenoemde houten doos met de antenne te bevestigen. De tafel werd geplaatst in een put van ongeveer 1 meter diepte, die geleidelijk gevuld werd met water en sneeuw om zo een sterk en compact blok ijs te vormen. Een geul van 500 meter lang en 1 meter diep werd gegraven in het ijs tussen de tafel en het meethok om er een elektriciteitskabel in te leggen,

omgeven door een beschermende buis om hem te weren tegen de koude, vochtige en beweeglijke omgeving (het ijs beweegt enkele millimeter per jaar). De geul was na enkele dagen alweer bedekt door de wind en de sneeuw (figuur 7)! Ondertussen werden de datalogger en de 2 computers in het beschutte meethok geplaatst en verbonden met de antenne terwijl een GPS werd bevestigd op het dak (niet om de plaats te bepalen, maar om een nauwkeurige tijdsreferentie te hebben). Testen van het meetsysteem toonden aan dat de computers het meethokje al te zeer opwarmden. Ze werden daarom verplaatst naar de

Figuur 6. Locatie van de meetantenne ten noordoosten van de Prinses Elisabethbasis. Foto: *Google Earth*.





Figuur 7. Instrument vastgemaakt op een houten tafel, zelf gebed in 1 meter sneeuw en ijs. In de verte rechts onderscheidt men de windmolens van de Prinses Elisabethbasis. Foto: *Darrouzet*.

basis en dat betekende een aanpassing van de bekabeling. De installatie moest opnieuw getest worden en vervolgens afgewerkt, met de installatie van een systeem met een autonome batterij voor de datalogger en de magnetische spoelen, enerzijds om korte stroomonderbrekingen op te vangen, maar anderzijds ook om het instrument te isoleren tegen kleine storingen op de elektrische voedingsspanning.

Eerste resultaten

Eenmaal het instrument en zijn analysesysteem waren geïnstalleerd, werden al snel whistlers gedetecteerd. Een voorbeeld is te zien in figuur 8, waarop twee magnetische spectrogrammen worden afgebeeld geregistreerd op 2 februari 2016. Zo een spectrogram toont de intensiteit van het ontvangen signaal als functie van de tijd (horizontale as, bestrijkt slechts 4 seconden) en van de frequentie (verticale as; 0-10 kHz). Het signaal ontvangen door de noord-zuid ge-

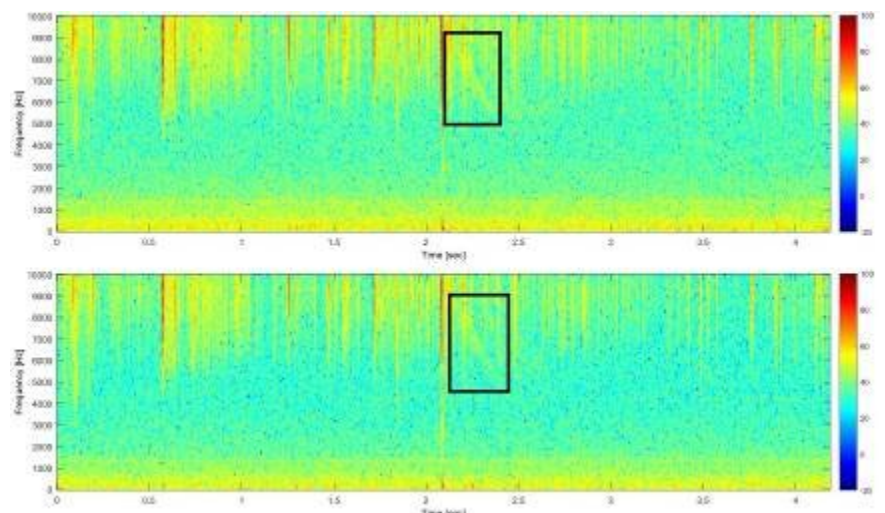
oriënteerde antenne wordt bovenaan getoond, dat van de oost-west antenne onderaan; de kleur is een maat voor de intensiteit van het signaal. Men kan zien dat er zeer weinig storingen zijn in het signaal. De verticale patronen zijn de zogenaamde atmosferische sferics en zijn zelf natuurlijke golven

gecreëerd door bliksem. Een whistler is duidelijk zichtbaar in het midden van de spectrogrammen (in de zwarte kaders), met een gebogen vorm zoals aangeduid in het schema in figuur 2. Ook een ander type elektromagnetische golf werd geobserveerd, de chorus waves. Die stralen in de zelfde frequentiereeks en hun brongebied bevindt zich over het algemeen op de magnetische evenaar.

Conclusie en toekomst

De installatie van deze magnetische antenne was dus een succes (figuur 9) en de eerste data lijken zeer interessant. De activiteitspiek van whistlers situeert zich normaal tijdens de winter in het zuidelijke halfrond, omdat er dan meer bliksems zijn tijdens de zomer in het noordelijke halfrond. Na een jaar zal het dus mogelijk zijn statistische analyses te bekomen van deze golven, in functie van de plaatselijke tijd en de maand. Ook kunnen ze vergeleken worden met gelijkaardige metingen elders op de Zuidpool. Bovendien is dit recent geïnstalleerde systeem op de Zuidpool, net zoals datgene dat 5 jaar geleden werd geïnstalleerd in Humain, geïntegreerd in het AWDA netwerk (Automatic Whistler Detector and Analyzer) dat de hele planeet

Figuur 8. Whistlers geobserveerd op de Prinses Elisabethbasis. Foto: *AWDAnet*.





Figuur 9. Panorama van 360 graden vanop het dak van de Prinses Elisabethbasis. Foto: Darrouzet.

dekt, met in het bijzonder 3 andere antennes op de Zuidpool.

Voor elke whistler die duidelijk geobserveerd wordt, is het mogelijk een volledige analyse uit te voeren om de dichtheid van elektronen in de equatoriale plasmasefeer te bepalen. De studie van een whistler waargenomen op 8 maart 2016 om 21^h34^m04^s UT, wees op een dichtheid van $879 \pm 29 \text{ cm}^{-3}$ op een radiale equatoriale positie van $3.04 \pm 0.08 R_E$. Deze waarde is coherent met de verkregen metingen van de satellieten en de numerieke simulaties. Het zal ook mogelijk zijn het brongebied te bepalen van de whistlers die worden gedetecteerd op de basis, door gebruik te maken van een wereldwijd bliksemlokalisatie netwerk (WWLLN, World Wide Lightning Location Network).

Het ultieme doel bestaat erin om een real-time analyse van de whistlers uit te voeren en om deze gegevens te gebruiken in een assimilatief model van de plasmasefeer.

Appendix

De whistlers en de chorus waves kunnen worden omgezet in een voor de mens hoorbare golf. Inderdaad, ze worden gedetecteerd binnen een reeks frequenties van 2 tot 20 kHz, terwijl het menselijke oor gevoelig is voor het ontvangen van frequenties tussen 20 Hz en 20 kHz. Zo heeft de muziekgroep Pink Floyd het muziekstuk 'Cluster One' van het album 'The Division Bell' geïntroduceerd met 1 minuut geluid van atmosferische sferics en chorus wave. (<http://www.divisionbell20.com/>).

Whistlers en andere golven kan je ook beluisteren op <http://www-pw.physics.uiowa.edu/plasma-wave/istp/polar/magnetosound.html>.

Dankwoord

De auteurs bedanken Dr. Lichtenberger, de oprichter van het internationale AWDAnet netwerk, het personeel

op de Prinses Elisabethbasis voor de steun en hulp tijdens de installatie van het instrument in januari-februari 2016, en BELSPO (Openbare dienst van de Programmatie van het Federaal Wetenschapsbeleid) en het STCE (Solar-Terrestrial Centre of Excellence) voor hun financiële en technische steun. Dit artikel verschijnt eveneens (in het Frans) in *Ciel et Terre*.

Referenties en sites

- Darrouzet Fabien, Ranvier Sylvain, en De Keyser Johan, Een meetstation voor whistler-golven om de plasmasefeer van de Aarde te bestuderen, *Heelal*, juli 2012, blz.222.
- <http://aeronomie.be/fr/nouvelles-presse/2016-antarctique.htm>
- <http://awda.aeronomie.be/>
- <http://plasmon.elte.hu/awdanet.htm>
- <http://www.antarcticstation.org/>

Wetenschappelijke literatuur

- D. L. Carpenter, Whistler evidence of a 'knee' in the magnetospheric ionization density profile, *J. Geophys. Res.*, 68(6), 1675-1682, doi:10.1029/JZ068i006p01675, 1963.
- A. B. Collier, S. Bremner, J. Lichtenberger, J. R. Downs, C. J. Rodger, P. Steinbach en G. McDowell, Global lightning distribution and whistlers observed at Dunedin, New Zealand, *Ann. Geophys.*, 28, 499-513, doi:10.5194/angeo-28-499-2010, 2010.
- A. B. Collier, J. Lichtenberger, M. A. Clilverd, C. J. Rodger en P. Steinbach, Source region for whistlers detected at Rothera, Antarctica, *J. Geophys. Res.*, 116, A03219, doi:10.1029/2010JA016197, 2011.
- F. Darrouzet, J. De Keyser en V. Pierrard (Eds.), *The Earth's Plasmasphere: A Cluster and Image Perspective*, 296 pp., Springer, New York, doi:10.1007/978-1-4419-1323-4, 2009a.
- F. Darrouzet, V. Pierrard, S. Benck, G. Lointier, J. Cabrera, K. Borre-

mans, N. Yu Ganushkina en J. De Keyser, Links between the plasma-pause and the radiation belt boundaries as observed by the instruments CIS, RAPID and WHISPER onboard Cluster, *J. Geophys. Res.*, 118, 4176-4188, doi:10.1002/jgra.50239, 2013.

- K. I. Gringauz, The structure of the ionized gas envelope of the Earth from direct measurements in the USSR of local charged particle concentrations, *Planet. Space Sci.*, 11(3), 281-296, doi:10.1016/0032-0633(63)90030-8, 1963.
- R. A. Helliwell, Low-frequency waves in the magnetosphere, *Rev. Geophys.*, 71(1-2), 281-303, 1969.
- A. Jorgensen, D. Ober, J. Koller en R. H. W. Friedel, Specification of the Earth's plasmasphere with data assimilation, *Adv. Space Res.*, 47, 2152-2161, doi:10.1016/j.asr.2010.06.013, 2011.
- J. Lichtenberger, A new whistler inversion method, *J. Geophys. Res.*, 114, A07222, doi:10.1029/2008JA013799, 2009.
- J. Lichtenberger, C. Ferencz, D. Hamar, P. Steinbach, C. J. Rodger, M. A. Clilverd en A. B. Collier, Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Implementation of the analyzer algorithm, *J. Geophys. Res.*, 115, A12214, doi:10.1029/2010JA015931, 2010.
- J. Lichtenberger, M. Clilverd, B. Heilig, M. Vellante, J. Manninen, C. J. Rodger, A. B. Collier, A. M. Jørgensen, J. Reda, R. H. Holzworth, R. Friedel en M. Simon-Wedlund, The plasmasphere during a space weather event: first results from the PLASMON project, *J. Space Weather Space Clim.*, 3, A23, doi:10.1051/swsc/2013045, 2013.
- L. R. O. Storey, An investigation of whistling atmospherics, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 246, 113-141, doi:10.1098/rsta.1953.0011, 1953.