

Afscheid van de wetenschappelijke Cluster-missie

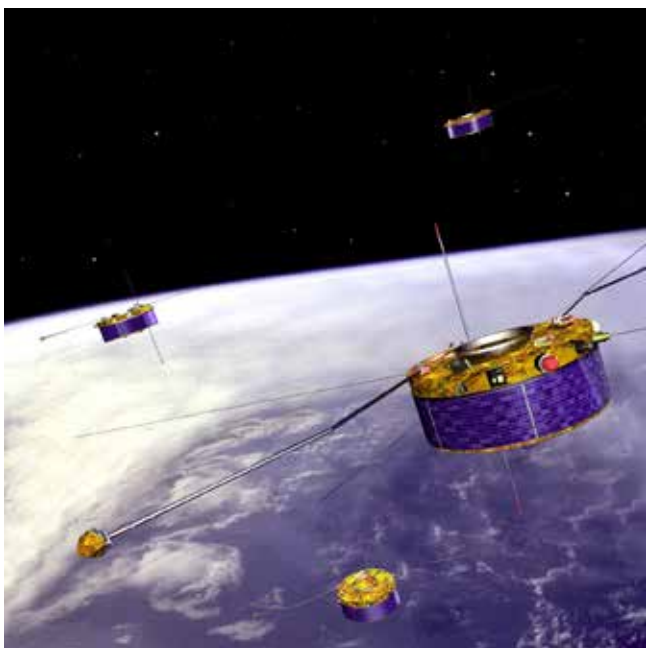
FABIEN DARROUZET, ROMAIN MAGGIOLO, JOHAN DE KEYSER, STÉPHANIE FRATTA, KAROLIEN LEFEVER
(KONINKLIJK BELGISCH INSTITUUT VOOR RUIMTE-AERONOMIE)

OP 8 SEPTEMBER 2024 OM 20^H47^M CEST KEERDE de eerste satelliet van de Cluster-missie (Salsa - Cluster 2) terug in de aardatmosfeer. Daarmee kwam een einde aan een ruimteavontuur dat meer dan 24 jaar heeft geduurd.

De Cluster-missie

Cluster is een ruimtemissie van het Europees Ruimtevaartagentschap, ESA. Ze werd in de zomer van 2000 gelanceerd met als doel de interactie tussen de zonnwind en de magnetische bel rond de Aarde, de magnetosfeer, te bestuderen. De oorspronkelijke versie van deze missie werd vernietigd als gevolg van een computerstoring op 4 juni 1996, tijdens de explosie van de allereerste vlucht van Europa's Ariane 5 draagraket, toen de raket brak en explodeerde minder dan 37 seconden na het opstijgen. De ESA besloot daarop om

Figuur 1. Artistieke impressie van de 4 Clustersatellieten in hun baan rond de Aarde. Foto: ESA.



een heropbouw van de vier satellieten (figuur 1) te financieren en ze in twee fasen te lanceren met Sojoez-Fregat-raketten vanaf de Bajkonoer-kosmodroom in Kazachstan. Salsa en Samba (respectievelijk Cluster 2 en Cluster 3) werden gelanceerd op 16 juli 2000 (zie figuur 2), terwijl Rumba en Tango (Cluster 1 en Cluster 4) minder dan een maand later, op 9 augustus 2000, de ruimte werden ingestuurd. Deze vier identieke satellieten werden in een polaire elliptische baan om de Aarde gebracht, op een hoogte tussen 4 en 19.6 aardstralen (1 aardstraal = 6371 km). De Cluster-missie werd 9 keer verlengd, waardoor de constellatie van 4 satellieten de nabije zonnwind en de magnetosfeer van de Aarde kon bestuderen gedurende 24 jaar, een unicum tot op de dag van vandaag. Tot en met 31 augustus 2024 werden er in totaal 3247 wetenschappelijke artikelen (met peer-review) gepubliceerd en 122 doctoraten verdedigd op basis van Cluster-metingen!

Figuur 2. Lancering van het eerste paar Cluster-satellieten (Salsa en Samba) door een Sojoez-Fregat raket vanaf de Bajkonoer-kosmodroom in Kazachstan op 16 juli 2000. Foto: ESA.

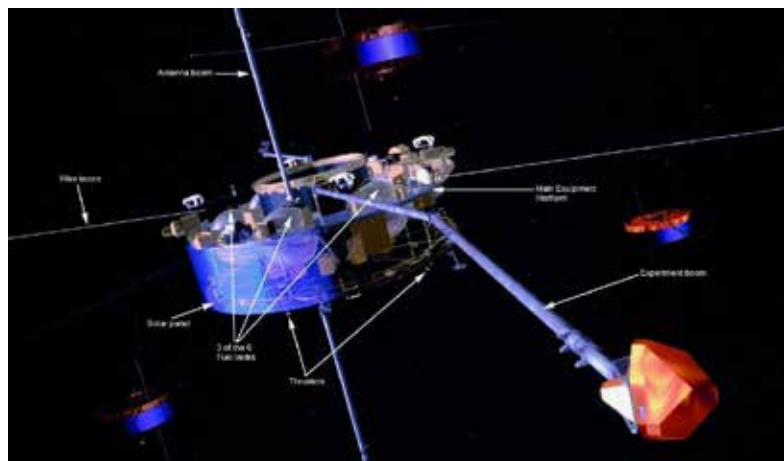
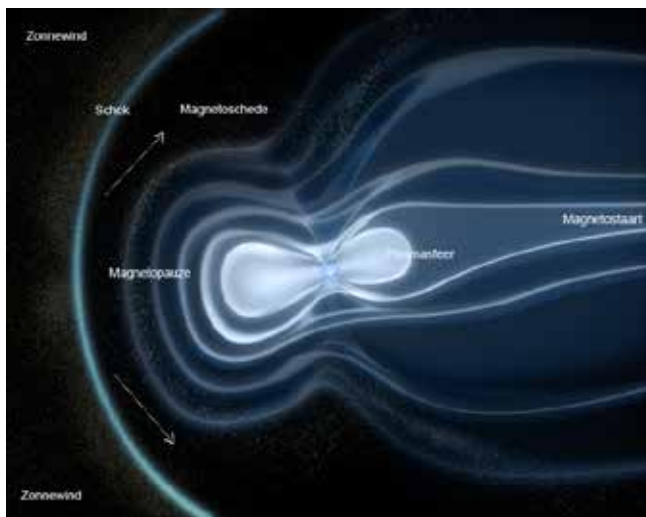


De magnetosfeer van de Aarde

De magnetosfeer van de Aarde is een holte in de interplanetaire ruimte, gevormd door het magnetische veld van de Aarde (figuur 3). Dit geeft de magnetosfeer zijn vorm: samengedrukt door de zonnewind aan de kant die naar de Zon is gericht, waar het zich uitstrekt tot ongeveer tien aardstralen, en uitgerekt aan de kant die van de Zon is afgewend, waar de magnetische staart zich uitstrekt tot enkele honderden aardstralen. Tussen de zonnewind en de magnetosfeer ontstaat een schokgolf die een grens vormt die bekendstaat als de boegschok. Tussen de schok en de magnetosfeer bevindt zich de magnetoschede. Daar wordt de zonnewind gedwongen om rond de magnetosfeer heen te bewegen. De grens tussen de zonnewind en de magnetosfeer vormt de magnetopauze. Aan de binnengrens van de magnetosfeer bevindt zich de ionosfeer. De magnetosfeer bestaat uit verschillende subregio's, zoals de (magnetische) poolkappen, de poollichtgebieden, de plasmasfeer, het plasmabladd en de lobben van de magnetostaart.

De unieke configuratie van de 4 Cluster-satellieten, elk met 11 wetenschappelijke instrumenten aan boord (figuur 4), heeft het mogelijk gemaakt om precieze metingen te doen van de fluctuaties in het magnetisch veld, om elektromagnetische golven te analyseren en om variaties waar te nemen in de samenstelling, dichtheid, temperatuur en snelheid van het geïoniseerde gas (plasma bestaande uit ionen en elektronen) dat aanwezig is in de verschillende subregio's van de magnetosfeer. Door 4 satellieten te gebruiken in plaats van slechts één, was Cluster in staat om deze grootheden tegelijkertijd te meten en daardoor tijdsvariaties te scheiden van ruimtelijke variaties. Wanneer ze dicht bij elkaar waren (enkele tientallen kilometers, soms zelfs maar 2.5 km tussen 2 satellieten), konden de Cluster-satellieten de details bestuderen van magnetische structuren die in de ruimte voorkomen op een schaal van enkele tientallen kilometer. Toen de satellieten verder uit elkaar stonden (tot enkele tienduizenden kilometers), hadden ze een globaal overzicht van de magnetosfeer en zonnewind op een grotere schaal.

Figuur 3. Schema met de belangrijkste regio's van de aardse magnetosfeer. Figuur: *Gérard Bodineau*.



Figuur 4. Schematische weergave van een van de 4 Cluster-satellieten, met verschillende instrumenten en de belangrijkste structurele kenmerken. Figuur: *ESA*.

De betrokkenheid van het BIRA in de Cluster-missie

Het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA) heeft een belangrijke rol gespeeld in deze missie. BIRA-onderzoekers hebben onder meer bijgedragen tot de ontwikkeling van het WHISPER-instrument (Waves of High frequency and Sounder for Probing of Electron density by Relaxation), dat zich aan boord van elk van de 4 Cluster-satellieten bevond. Dit instrument mat de elektromagnetische golven die zich voortplanten in de magnetosfeer, en leverde op basis daarvan zeer precieze waarden van de elektronendichtheid. Het BIRA was ook sterk betrokken bij een ander instrument voor het meten van golven: STAFF (Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuation).

De resultaten en nalatenschap van de Cluster-missie

Onderzoekers van het BIRA hebben nieuwe technieken ontwikkeld om de gelijktijdige metingen van de vier satellieten te interpreteren wanneer ze zich dicht genoeg bij elkaar bevonden. Wetenschappers van het BIRA hebben talrijke studies gepubliceerd die gebruikmaken van Cluster-metin-

Figuur 5. Boekomslagen van twee boeken uitgegeven door wetenschappers van het BIRA. Figuur: *Springer – Wiley*.



gen. Ze hebben bijgedragen aan het verbeteren van de kennis van onze ruimteomgeving, van de bovenste atmosfeer waar poollicht wordt gevormd tot de buitenste regionen van de magnetosfeer waar ze interageert met de zonnwind. Voorbeelden hiervan zijn de publicatie van een boek over de plasmasfeer dat grotendeels gebaseerd is op Cluster-gegevens, de creatie van een video over de plasmasfeer (<https://www.youtube.com/watch?v=-hTNuJZByDc>) en de publicatie van een boek over de magnetosferen in het zonnestelsel (figuur 5). Bovendien is het BIRA de laatste 2 jaar betrokken geweest bij een project om een globale analyse uit te voeren van de gegevens van de volledige Cluster-missie, het GRMB-project (Geospace Region and Magnetospheric Boundary).

Het GRMB-project: naar een preciezere classificatie van de regio's in de magnetosfeer

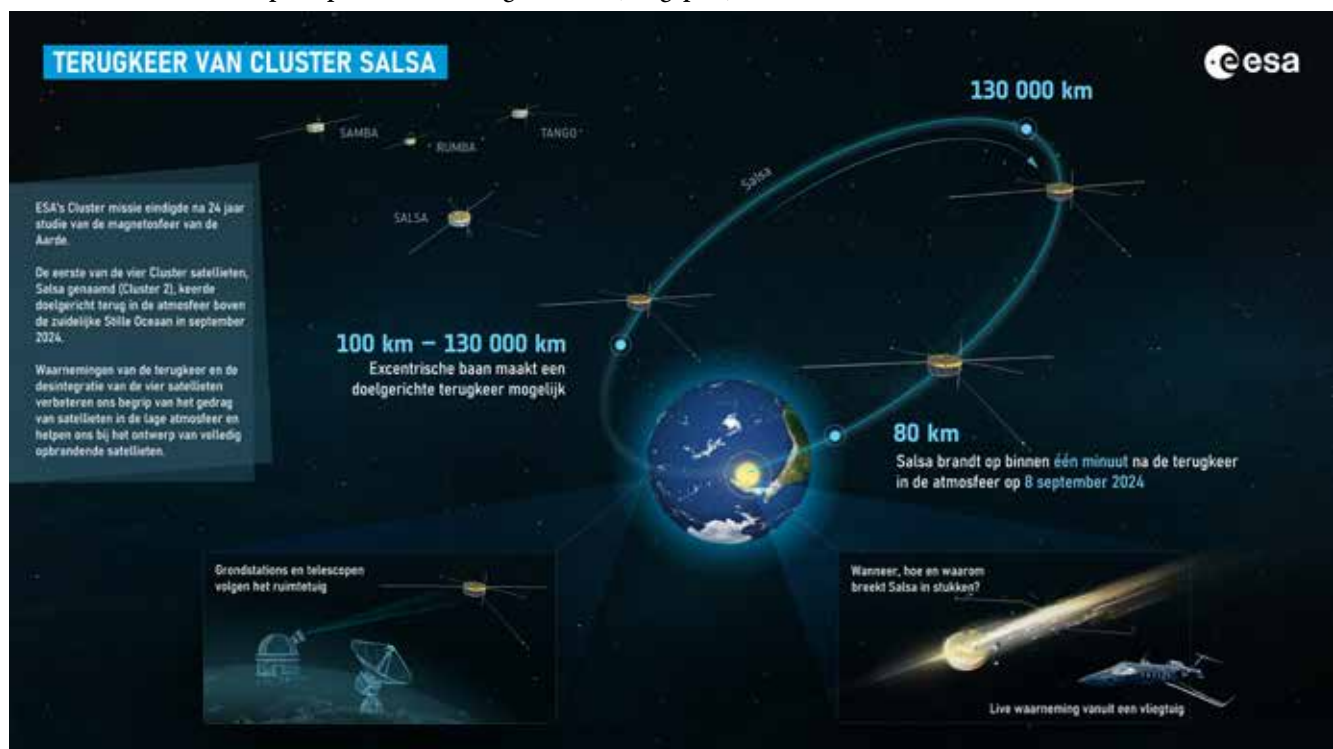
De correcte classificatie van de regio's en grenslagen die de satellieten doorkruisen, is essentieel om de gegevens van elke magnetosferische missie te evalueren. Dit geldt in het bijzonder voor de Cluster-satellieten, gezien de immense hoeveelheid gegevens die in 24 jaar tijd verzameld werden en de voortdurende variabiliteit in de positie en afmetingen van deze regio's, in het bijzonder door veranderingen in de zonneactiviteit. Dit maakt het mogelijk om statistische studies uit te voeren van de fundamentele plasmaprocessen die in een bepaalde regio plaatsvinden, zoals het opvullen van de plasmasfeer vanuit de ionosfeer, de reconnectie tussen zonnwind en aardmagnetisch veld in de magnetopauze, de turbulentie in de magnetosfeer of de voortplanting van

golven in de magnetosfeer. Bovendien is de magnetosfeer een erg dynamische omgeving, waardoor de regio's niet geïdentificeerd kunnen worden op basis van baaninformatie alleen. Het BIRA is actief betrokken bij een ESA-project dat tot doel heeft een database te creëren die de positie van elke Clustersatelliet tijdens de missie weergeeft, niet in de vorm van geografische coördinaten, maar door de regio's, overgangsgebieden en grenslagen te beschrijven die door de satellieten worden doorkruist. Het resultaat is een database met de naam "Geospace Region and Magnetospheric Boundary" (kortweg GRMB), die sinds eind 2024 beschikbaar zijn op de website die de wetenschappelijke gegevens van de Cluster-missie archiveert. Maar helaas, aan elke wetenschappelijke missie komt een einde...

Het begin van het einde

Inderdaad, na 24 ongelooflijk succesvolle jaren in de ruimte, op het moment dat de brandstof- en batterijopslagcapaciteit die nodig was om de satellieten in hun correcte baan te houden bijna uitgeput was, nam de ESA de beslissing om de 4 Cluster-satellieten tussen september 2024 en augustus 2026 uit hun baan om de Aarde te halen. De planning voor de terugkeer van de satellieten doorheen de atmosfeer van de Aarde laat de Cluster-missie toe om, bij wijze van afscheid, bij te dragen aan wetenschappelijk onderzoek in verband met de terugkeer van satellieten door de atmosfeer. Door de terugkeer van 4 identieke satellieten onder verschillende omstandigheden en met licht verschillende banen te vergelijken, voert het ESA-ruimteschrootteam een waardevol experiment uit om het uiteenvallen van satellie-

Figuur 6. Infografiek die laat zien hoe de eerste van de 4 Cluster-satellieten, Salsa, de atmosfeer van de Aarde weer binnenkwam boven de Stille Zuidzee op 8 september 2024. Figuur: ESA (aangepast).



ten in de atmosfeer te bestuderen. Op termijn zal dit de terugkeer van satellieten nog veiliger maken. Toen de Cluster-satellieten in de jaren negentig van de vorige eeuw gebouwd werden, was er geen enkele regelgeving van kracht om het risico op schade bij hun terugkeer naar de Aarde te minimaliseren. Zonder interventie zouden de vier Cluster-satellieten op een veel minder gecontroleerde manier opnieuw in de atmosfeer van de Aarde zijn terechtgekomen, zonder de mogelijkheid om het tijdstip en de plaats van hun terugkeer te kiezen.

Op 8 september 2024, om 20^h47^m CEST, kwam de eerste satelliet van de Clustermissie, Salsa, de atmosfeer van de Aarde weer binnen in de Stille Zuidzee, ten westen van Chili (figuur 6). De terugkeer volgde op een aanpassing van Salsa's baan in januari 2024 om zo ver mogelijk van bevolkte gebieden te vliegen, zodat alle onderdelen van de satelliet die de terugkeer door de atmosfeer zouden overleven in de oceaan zouden terechtkomen. In de laatste dagen en weken hielden de satellietoperatoren Salsa nauwlettend in het oog terwijl deze de Aarde naderde. Ze hebben de baan van de satelliet slechts één keer dienen aan te passen om hem op koers te houden.

De terugkeer verliep zonder problemen en op het voorziene tijdstip. Terwijl alle wetenschappelijke instrumenten die nog operationeel waren op de satelliet midden juli 2024 waren uitgeschakeld, werden 2 instrumenten opnieuw geactiveerd voor de laatste uren van Salsa: de elektronen-detector PEACE (Plasma Electron And Current Experiment) en de FGM-magnetometer (FluxGate Magnetometer). Magnetische gegevens van FGM werden geregistreerd tot 20^h10^m CEST, amper iets meer dan 30 minuten voordat de satelliet volledig werd vernietigd. Dit maakt een nauwkeurige en wetenschappelijke analyse mogelijk van de te-

Figuur 7. Zwart-witfoto genomen vanuit een vliegtuig waarop het aardoppervlak onderaan te zien is en een heldere stip in de verte boven het aardoppervlak. Deze stip is de Salsa-satelliet, die op 8 september 2024 zijn terugkeer in de atmosfeer van de Aarde maakte en in de Stille Zuidzee, ten westen van Chili, terechtkwam. Foto: ESA / ROSIE / University of Southern Queensland; foto gemaakt door Ranjith Ravichandran en Gerard Armstrong.



rugkeer van de satelliet in de atmosfeer.

In samenwerking met Astros Solutions stuurde de ESA een vliegtuig om de terugkeer van Salsa live vanuit de lucht te observeren en te bestuderen. Het vliegtuig was met succes getuige van de terugkeer in de dampkring en verzamelde ongekende gegevens over hoe een satelliet desintegreert. Een beeld van Salsa tijdens deze terugkeer werd gemaakt door camera's aan boord van het vliegtuig (zie figuur 7).

Salsa zal de komende jaren worden gevolgd door de 3 andere Clustersatellieten (Rumba in november 2025, Samba en Tango in augustus 2026). Deze 3 satellieten bleven wetenschappelijke metingen uitvoeren tot eind september 2024. Daarna werden de satellieten op stand-by gezet en houden ESA-operatoren ze in de gaten om het risico op botsingen met andere satellieten tot een minimum te beperken en te voorkomen dat ze boven bewoonde gebieden van de Aarde neerstorten.

Meer informatie

Clustermissie op de website van de ESA:

- <https://www.cosmos.esa.int/web/csa/the-mission>
- https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cluster

Einde van de Clustermissie:

- https://www.esa.int/Space_in_Member_States/The_Netherlands/Welgerusten_Cluster_briljant_einde_van_baanbrekende_missie

Advertentie

Vacature Ruimtemonitor Euro Space Center

Het Euro Space Center ligt in het hart van de Ardennen in een groene, inspirerende omgeving. Het centrum heeft een deeltijdse vacature voor een Nederlandstalige ruimtemonitor met volgende taken:

- Het omkaderen van families en kinderen om hen een verrijkende ruimte-ervaring aan te bieden.
- Ruimtevaart gerelateerde workshops en stages voor jonge aspirant-astronauten animeren, over verschillende onderwerpen zoals het leven en de opleiding van astronauten, het zonnestelsel, het bouwen van raketten, robotica, ...

Een volledig overzicht van deze vacature is te vinden op <https://www.eurospacecenter.be/fr/job/consult/12/ruimte-monitor>.

Wil je deel uitmaken van een dynamisch en gepassioneerd team, solliciteer dan nu door je motivatiebrief en CV op te sturen naar: claire.demunck@eurospacecenter.be. Het Euro Space Center bevordert gelijke kansen en diversiteit en verwelkomt kandidaten van alle achtergronden.