



VVS  
WG Kometen >>  
6 mei 2023

# Komeetonderzoek van Rosetta tot Comet Interceptor

*Johan De Keyser*

Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie

[Johan.DeKeyser@aeronomie.be](mailto:Johan.DeKeyser@aeronomie.be)

ROYAL BELGIAN INSTITUTE FOR  
SPACE AERONOMY





# Kometen en ruimte-onderzoek

Een komeetkern is enkele km groot (bv. 5 km). Zelfs tijdens een nauwe passage dichtbij de Aarde (0.1 au) zie je die kern als een object met diameter  $< 0,5''$ .

Wil je iets meer weten over kometen, dan moet je dus ter plekke gaan. Klemtoon is hier op de recente ESA missies.

Uitdagingen bij een komeetmissie:

- Enkel voor kortperiodieke kometen is de baan gekend.
- Inclinatie is soms hoog.
- Grote snelheid nabij perihelium (10-70 km/s rond 1 au).
- Stof-impact risico is groot.



# Mogelijkheden

- Flyby van een kortperiodieke komeet
  - Kan nabij 1 ae, gekende baan, inclinatie maakt niet uit als je de flyby bij één van de knopen doet.
  - Banen zijn soms al wat circulair: kleinere relatieve flyby snelheid
  - Nadeel: korte ontmoeting, beperkte hoeveelheid data
- Begeleiding van een kortperiodieke komeet
  - Grote Delta V nodig, eventueel gravity assists gebruiken
  - Voordeel: langdurige ontmoeting, veel data
- Flyby van een dynamisch nieuwe komeet
  - Kan nabij 1 ae, baan ongekend
  - Meest waarschijnlijke flyby snelheid is 50 km/s
  - Nadeel: Korte ontmoeting, beperkte data, maar net haalbaar



# Giotto

- Flyby van 1P/Halley
- Lancering juli 1985, flyby maart 1986 op 600 km
- Follow-up missie naar 26P/Grigg-Skjellerup in 1992 op 200 km

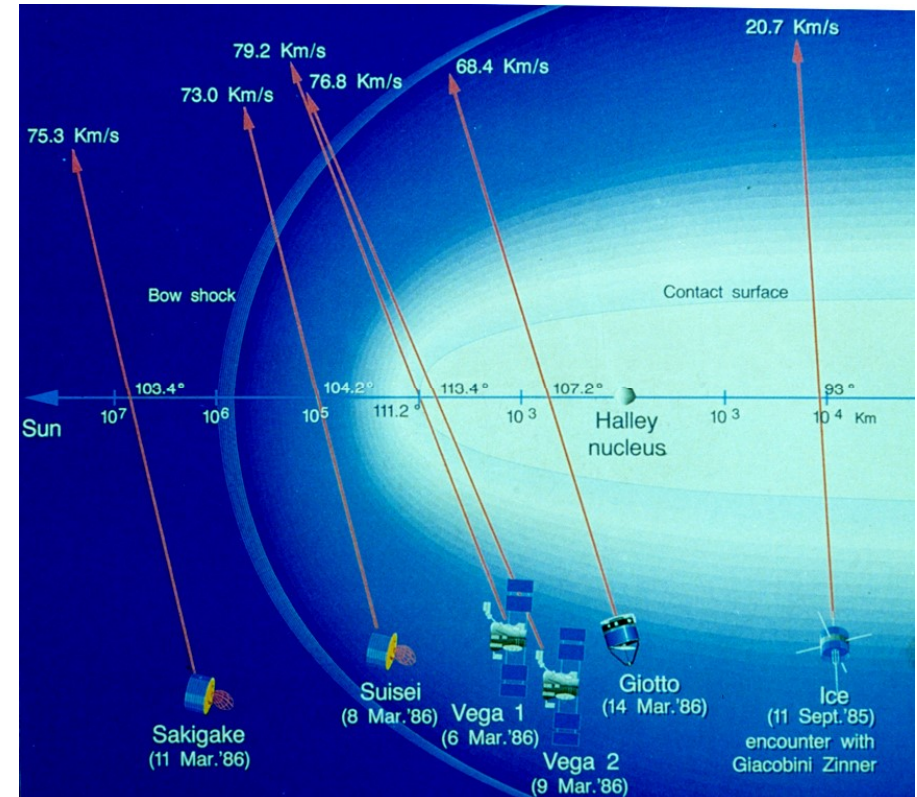




## Een hele vloot ruimtetuigen

ESA's Giotto voerde de eerste nabije flyby uit op  $< 1000$  km van een nucleus. Dit vereiste nauwkeurige kennis over de baan van de komeet en de positie van het ruimtetuig.

Baaninformatie van vooral de Vega's was daarbij cruciaal.





# Satellietconcept

Risico op stofimpact:

- Stofschild in de ram richting (niet de richting van de komeet)
- Instrumenten beschermd door Whipple stofschild
- Periscoop voor cameras
- Live telemetrie enkel als de HGA op de Aarde gericht blijft
- Automatische attitude-controle

Gebeurde effectief kort na CA; attitude herwonnen na 32 minuten, camera beschadigd





# Instrumenten

Experiment or instrument	Principal investigator	Institute
<b>MAG:</b> Magnetometer	F.M. Neubauer	University of Cologne, Germany
<b>HMC:</b> Halley Multicolour Camera	H.U. Keller	MPI, Lindau, Germany
<b>DID:</b> Dust Impact Detection System	J.A.M. McDonnell	University of Kent, Canterbury, UK
<b>RPA:</b> Rème Plasma Analyser	H. Rème	CESR, Toulouse, France
<b>JPA:</b> Johnstone Plasma Analyser	A. Johnstone	Mullard Space Science Laboratory, Holmbury St Mary, UK
<b>PIA:</b> Particulate Impact Analyser	J. Kissel	MPI, Heidelberg, Germany
<b>OPE:</b> Optical Probe Experiment	A. C. Levasseur-Regourd	CNRS, Verrières-le-Buisson, France
<b>EPA:</b> Energetic Particles	S.M.P. McKenna-Lawlor	St. Patrick's College, Maynooth, Ireland
<b>NMS:</b> Neutral Mass Spectrometer	D. Krankowsky	MPI, Heidelberg, Germany
<b>IMS:</b> Ion Mass Spectrometer	H. Balsiger	University of Bern, Switzerland
<b>GRE:</b> Giotto Radio Experiment	P. Edenhofer	Ruhr University, Bochum, Germany



## Foto's van de nucleus

- Iconische eerste beelden van een nucleus
  - Dag-nacht asymmetrie, jets, ...
- Unieke info over samenstelling
  - $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ , ...
  - gepolymeriseerd  $\text{H}_2\text{CO}$  op stof
  - fotodissociatie-producten

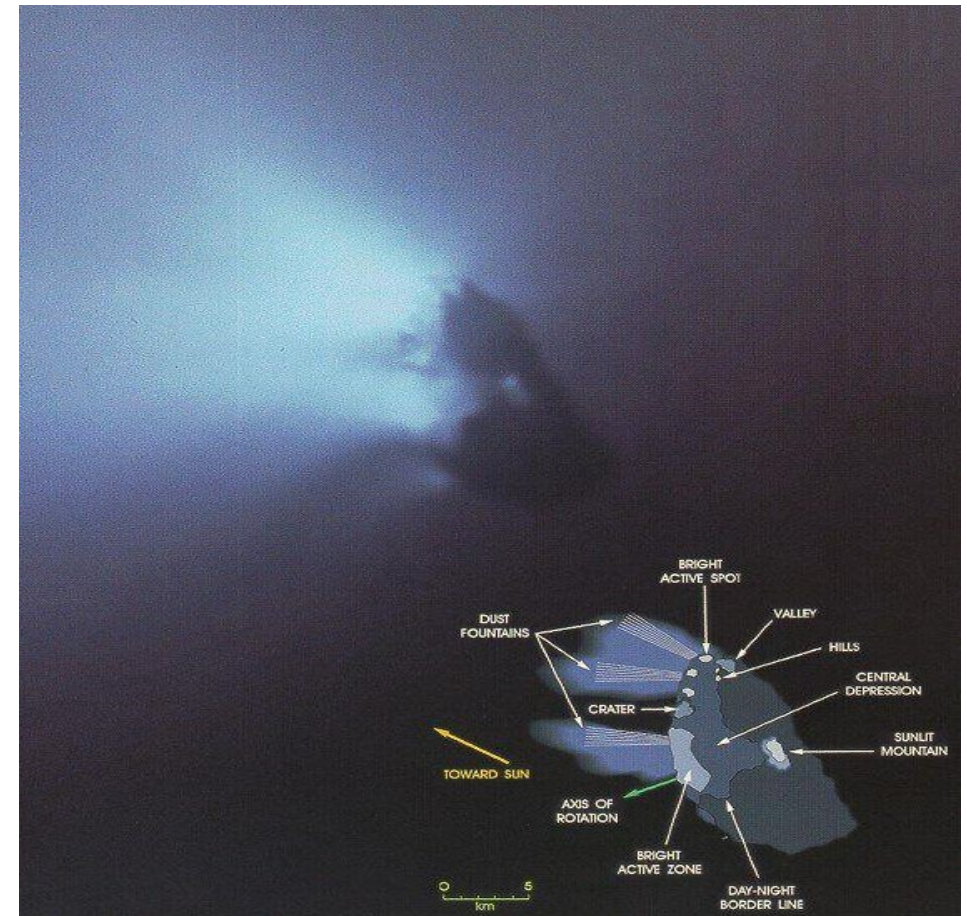






# Resultaten

- Kern 15 km x 10 km
- De kern is poreus, dichtheid  $0.3 \text{ g/cm}^3$ .
- Laag albedo 0.04
- Dikke stoflaag, plaatselijke stof-fonteinen, max 10% van het oppervlak.
- Niet echt een vuile sneeuwbal: stof domineert.





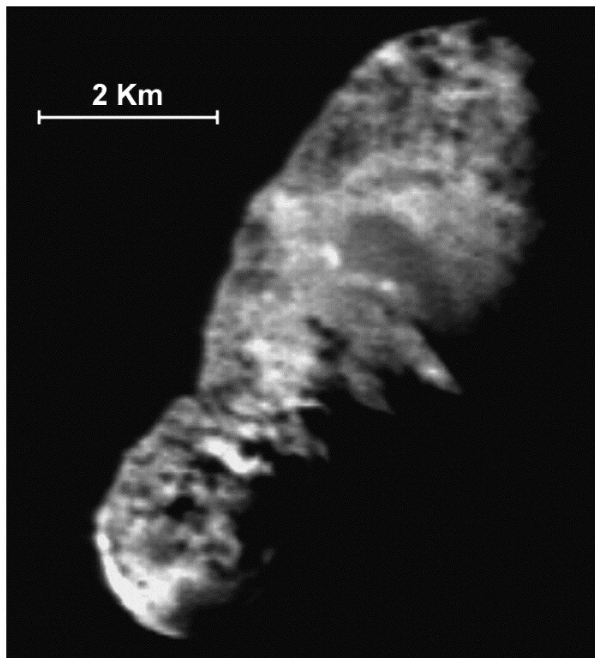
## Andere missies

- Deep Space 1 @ 19P/Borrelly
- ICE (ISEE-3) @ 21P/Giacobini-Zinner
- Ulysses
- Stardust @ Comet Wild 2, collecting dust within 240 km from the nucleus in 2004, returned in 2006.
- Deep Impact @ Comet Tempel 1 in 2005 with impactor
- Deep Impact = EPOXI @ Comet Hartley 2 in 2010.
- Stardust-NExT @ Comet Tempel 1 in 2011
- Deep Impact = EPOXI @ Comet Garradd in 2012



# Interessante close-ups

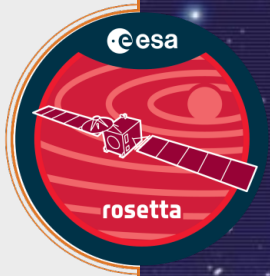
Borrelly



Hartley 2







# Rosetta

- Langdurige begeleiding van 67P/Churyumov-Gerasimenko
- Start in 1986, lancering 2004, bij komeet 2014-2016
- Philae lander





# Lancering

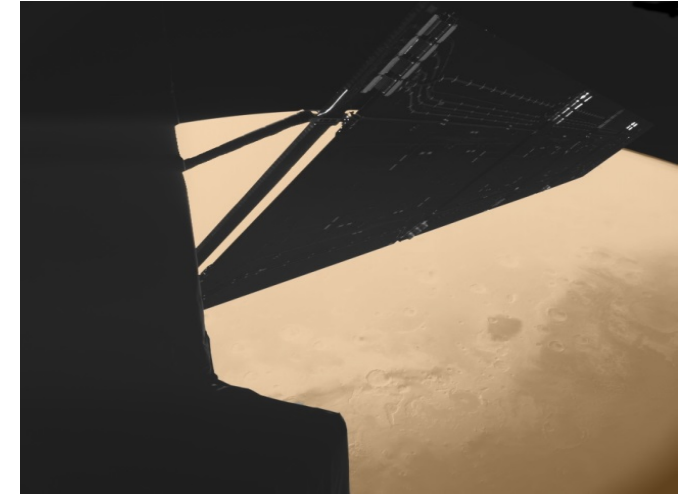
- Oorspronkelijk doel: 46P/Wirtanen
- Lancering voorzien begin 2003 maar uitgesteld omwille van mislukking van Ariane 5 ECA eind 2002.
- Nieuw doel: 67P/Churyumov-Gerasimenko
- Lancering 2 maart 2004
- Beide kometen zijn periodiek, ingevangen door passage bij Jupiter (JFCs)



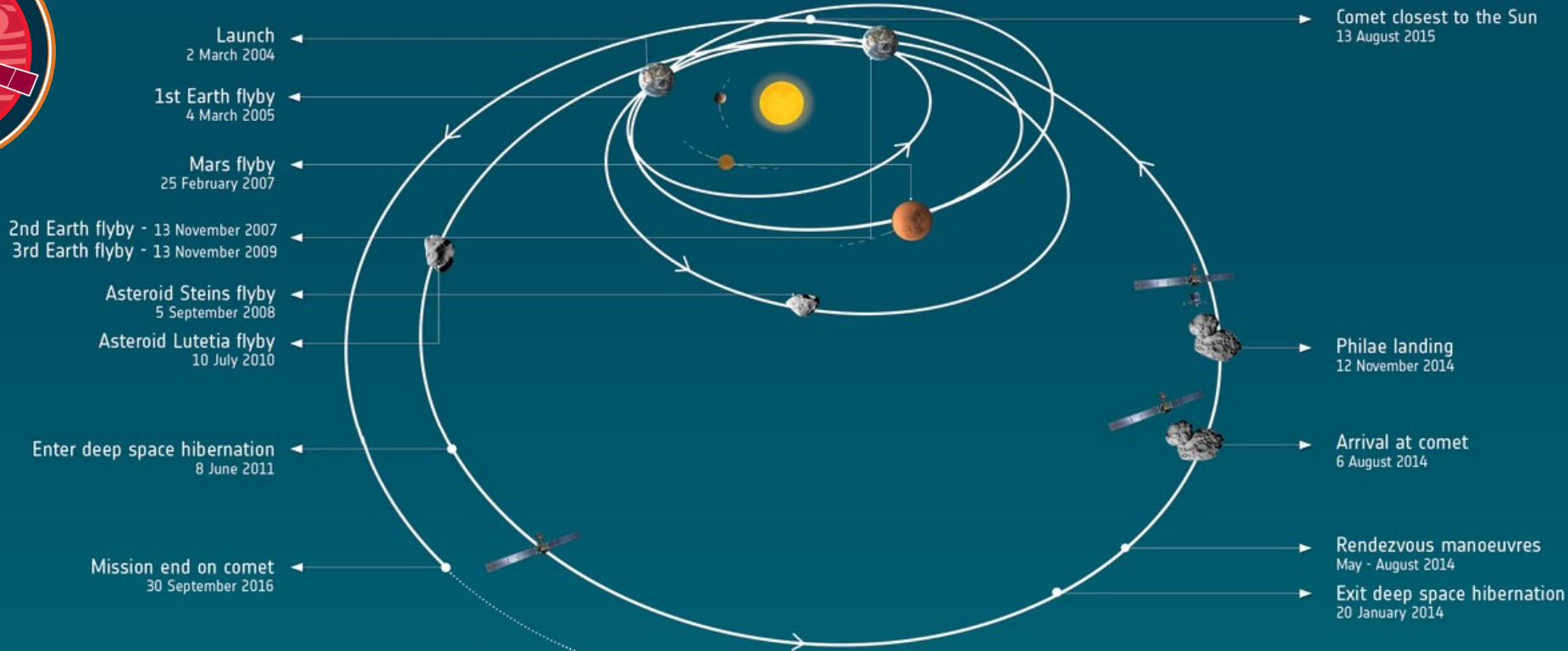


## Reis

- Passage bij de Aarde in 2005, 2007 en 2009, bij Mars in 2007
- Bezoek aan asteroïden Steins (2008) et Lutetia (2010)
- Hibernatie tot januari 2014
- Nadering van 67P in juli 2014 tot op 100 km, op 3,25 ae
- Landing van Philae in november 2014
- Navigatieproblemen maart 2015
- Perihelium op 1,2 ae in oktober 2015
- Einde missie 30 september 2016



# → ROSETTA'S JOURNEY 2004-16



**2 March 2004** Launch

**4 March 2005** 1st Earth flyby

**25 February 2007** Mars flyby

**13 November 2007** 2nd Earth flyby

**5 September 2008** Asteroid Steins flyby

**13 November 2009** 3rd Earth flyby

**10 July 2010** Asteroid Lutetia flyby

**8 June 2011** Enter deep space hibernation

**20 January 2014** Exit deep space hibernation

**May - August 2014** Comet rendezvous manoeuvres

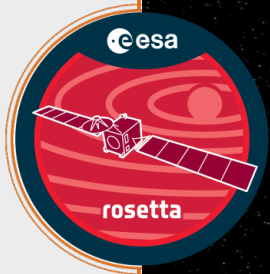
**6 August 2014** Arrival at comet

**12 November 2014** Philae landing

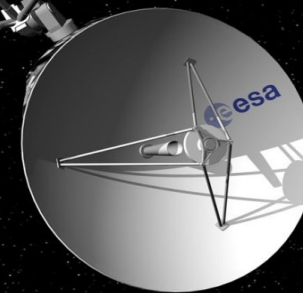
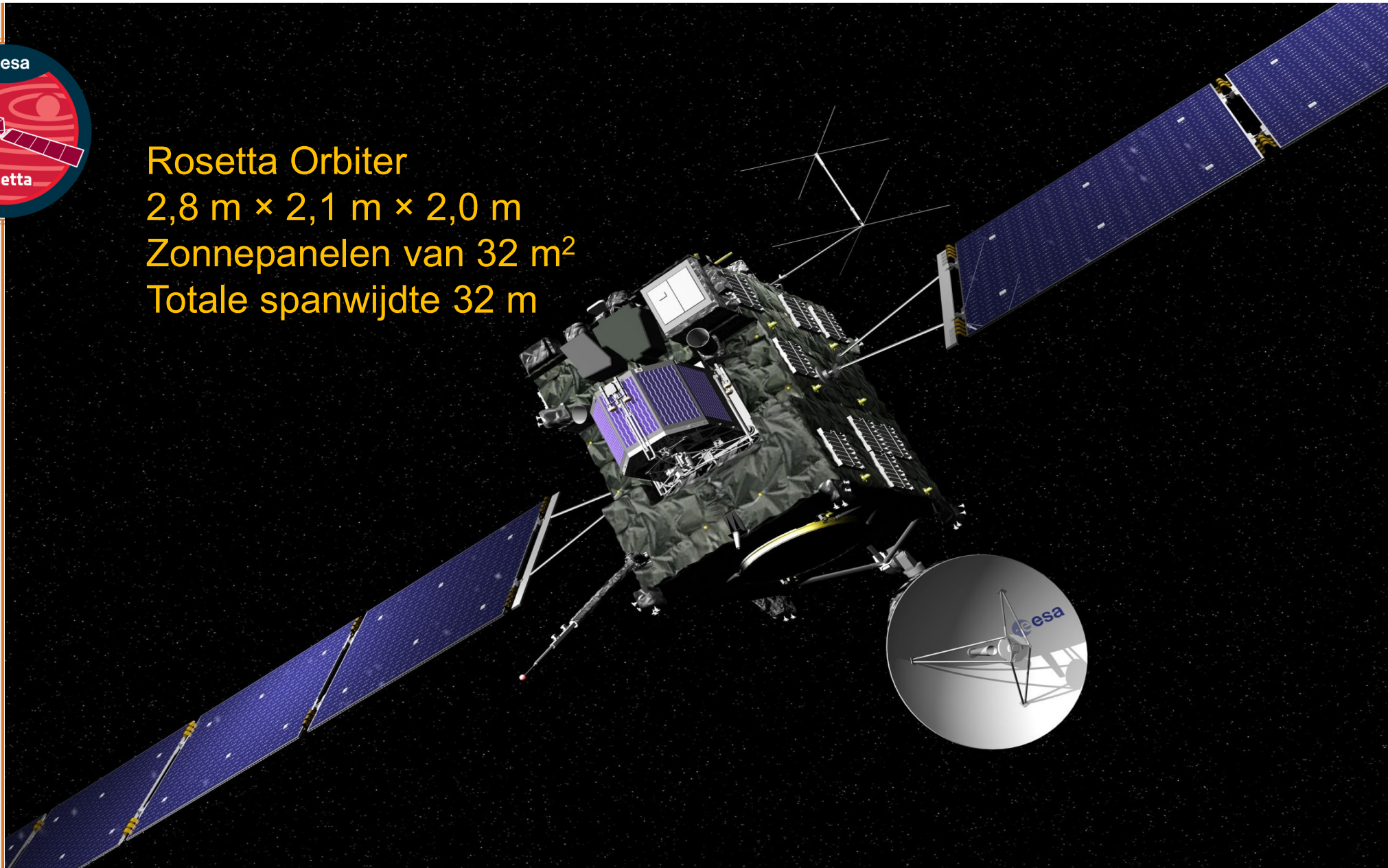
**13 August 2015** Comet closest to the Sun

**30 September 2016** Mission end

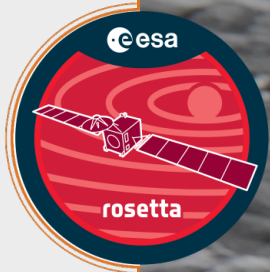




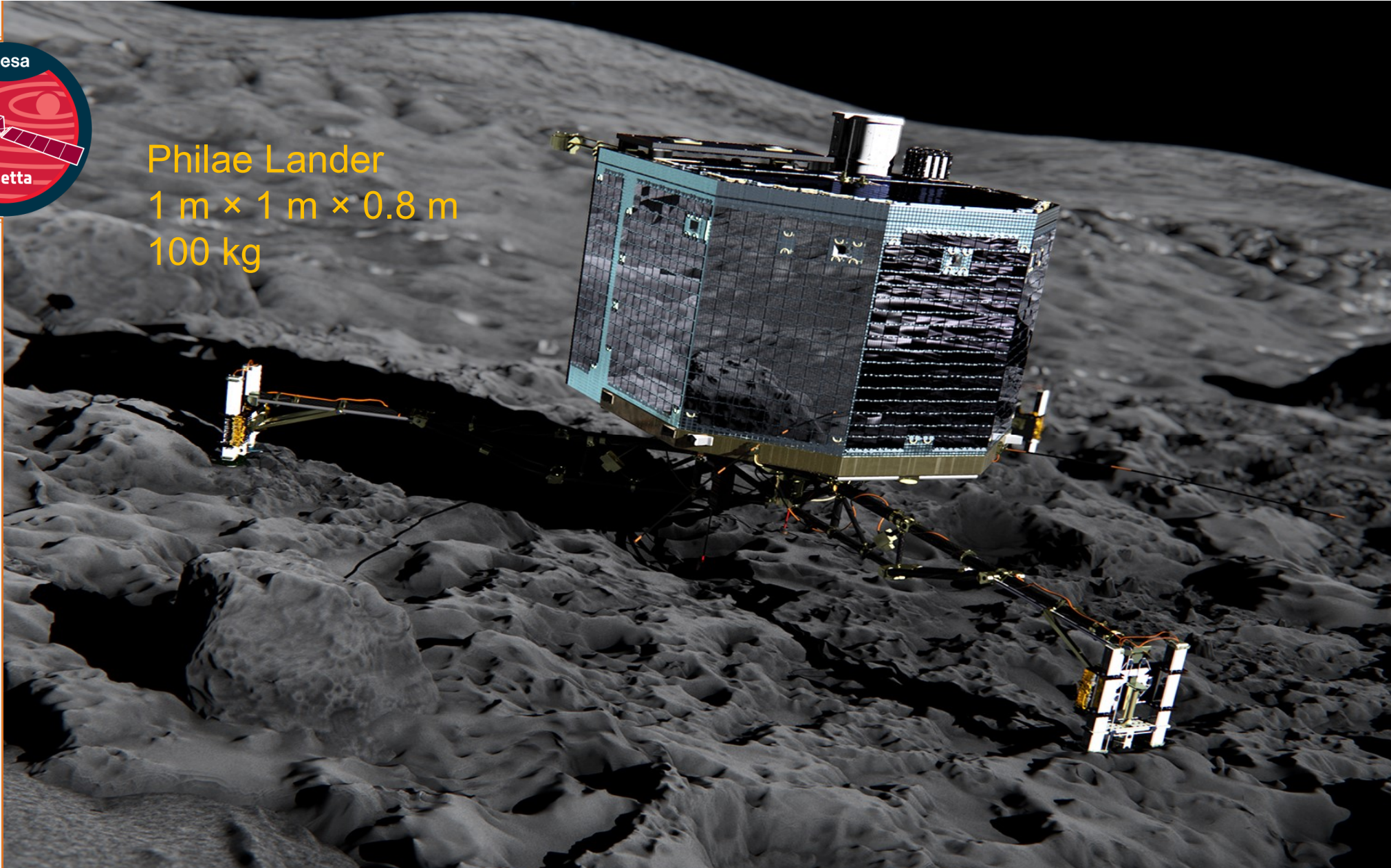
Rosetta Orbiter  
2,8 m × 2,1 m × 2,0 m  
Zonnepanelen van 32 m<sup>2</sup>  
Totale spanwijdte 32 m







Philae Lander  
1 m × 1 m × 0.8 m  
100 kg





# Wetenschappelijke doelstellingen

## Samenstelling van de kern

- Analyse in situ door Philae & analyse door Rosetta v/d coma

Oppervlakteprocessen op de kern (“activiteit”)

- Analyse in situ door Philae & teledetectie door Rosetta

Scheikundige process in een komeet

- Analyse door Rosetta van de coma

## Interactie met de zonnewind

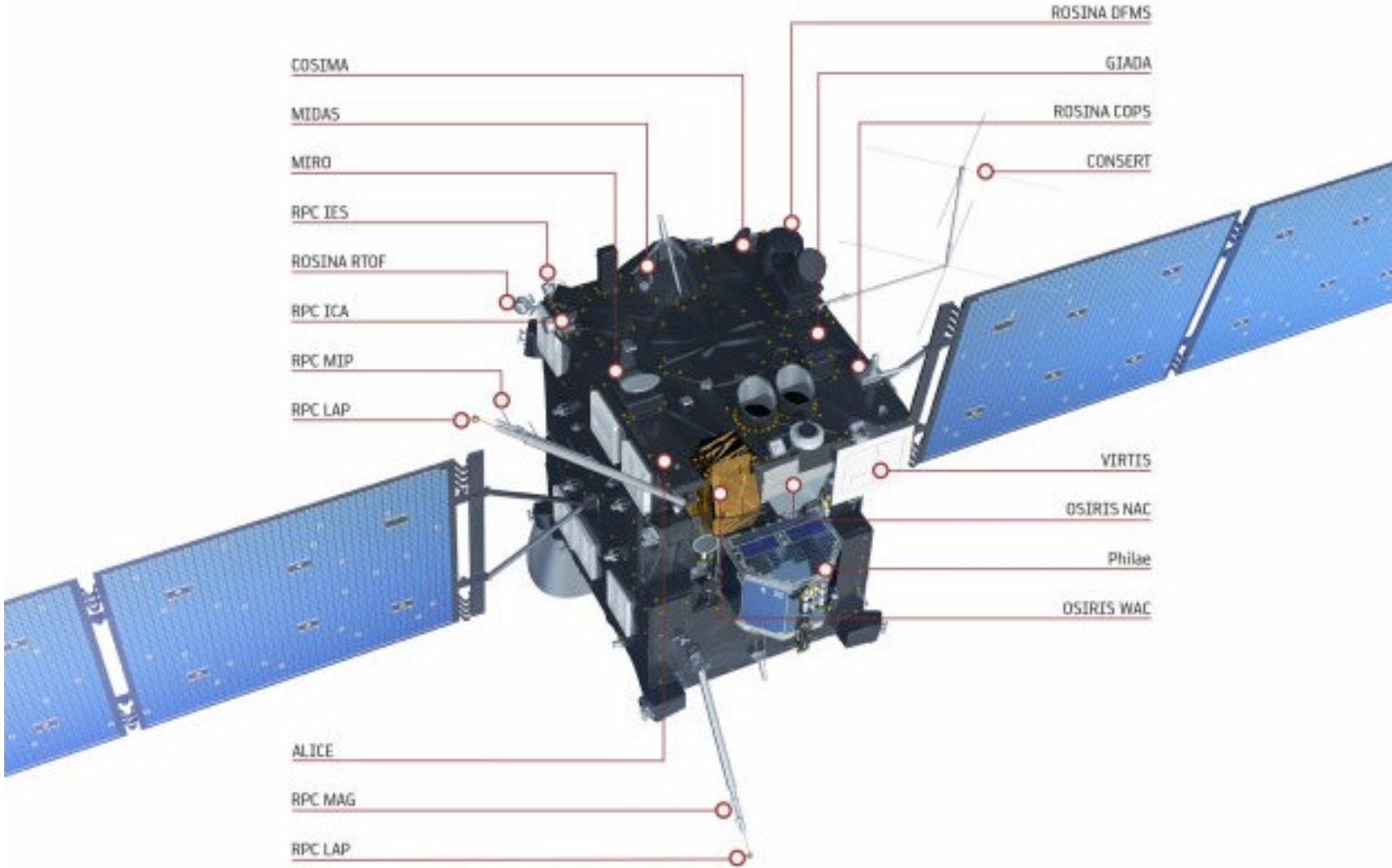
- Plasma experimenten op Rosetta

## Stof en refractair materiaal & relatie met asteroiden

- Analyse in situ door Philae en Rosetta  
& teledetectie door Rosetta



# Instrumenten

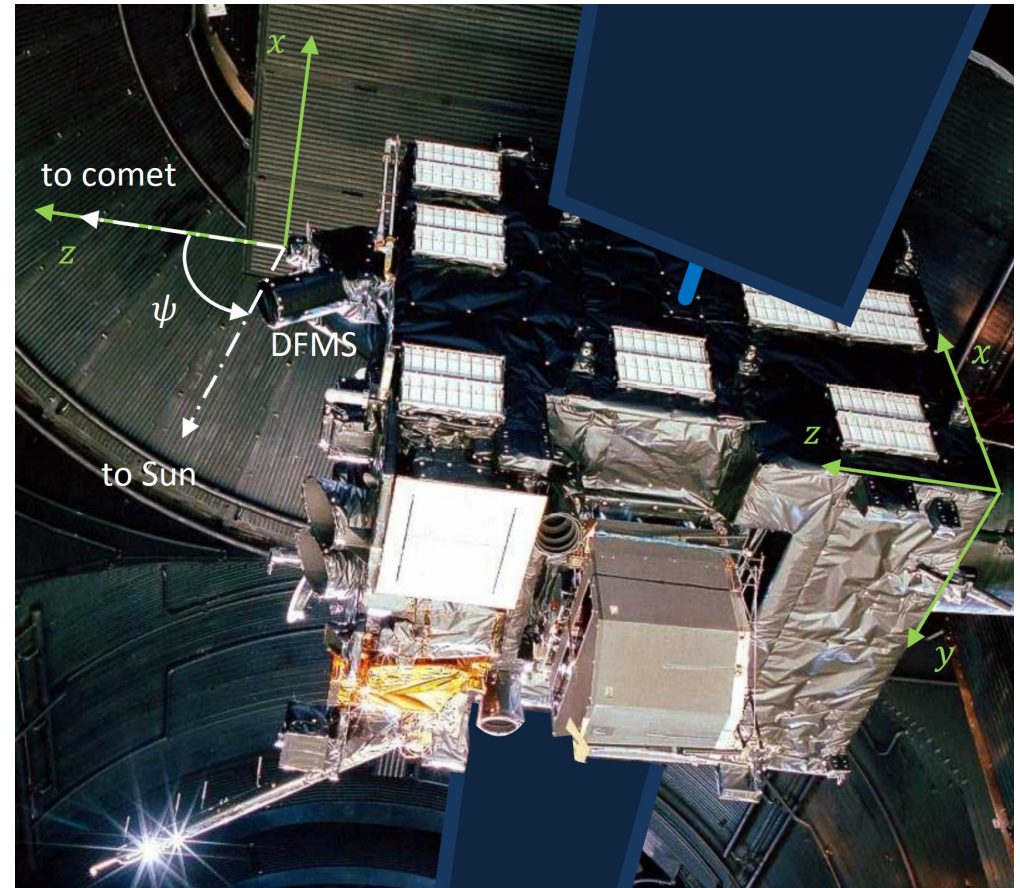






# Waarnemingsgeometrie

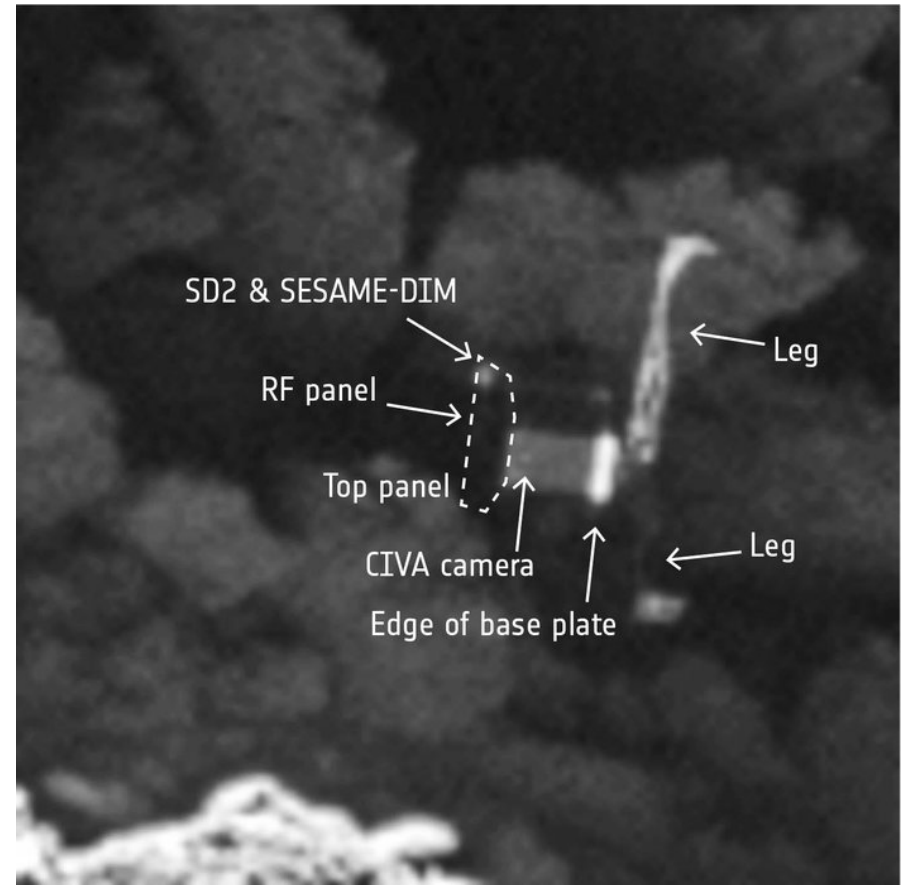
- Waarnemingsplatform gericht op de komeet
- Zonnepanelen scharnieren met 1 vrijheidsgraad
- High Gain Antenne beweegt met 2 vrijheidsgraden







De waarnemingsgeometrie van Philae was anders dan bedoeld ...





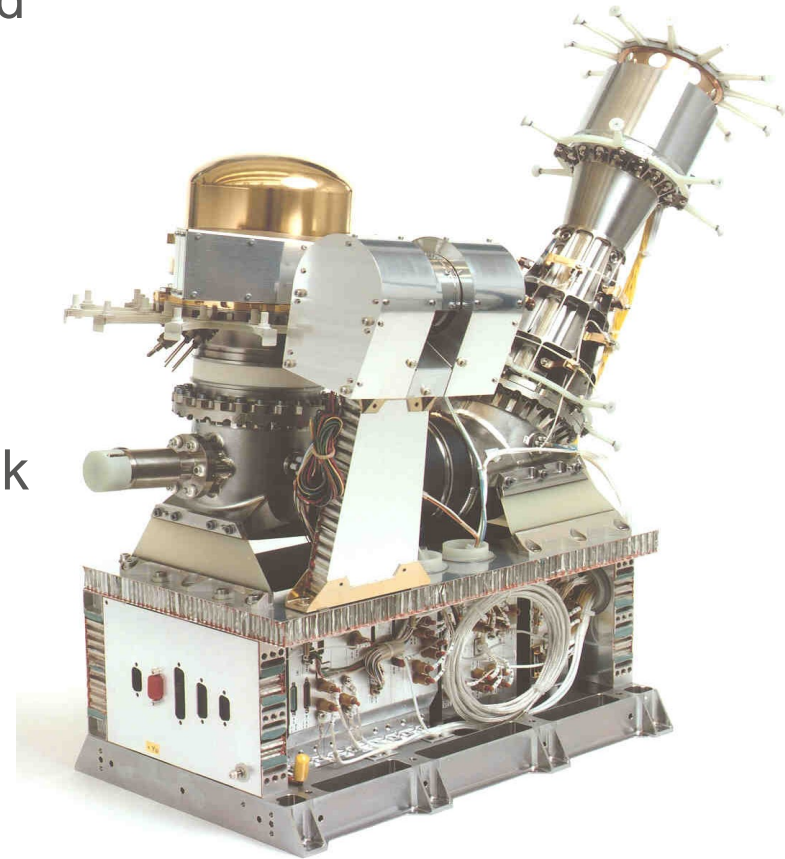
# ROSINA DFMS

Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis

- COPS + RTOF + DFMS

Gebouwd door internationaal team

- Uni Bern, Zwitserland
- IRAP Toulouse en LPP Paris, Frankrijk
- Max Planck Institut Lindau, Duitsland
- Lockheed Martin, USA
- BIRA, België
- + industrie (o.a. IMEC)

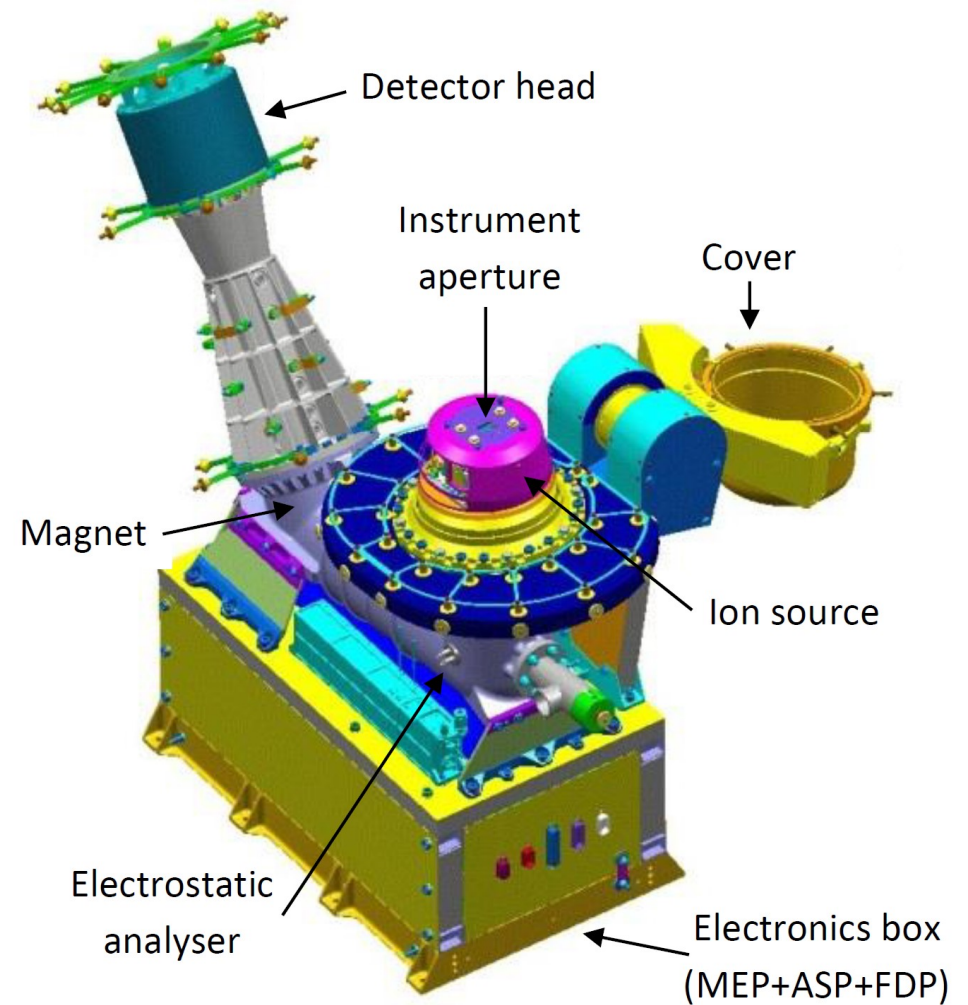




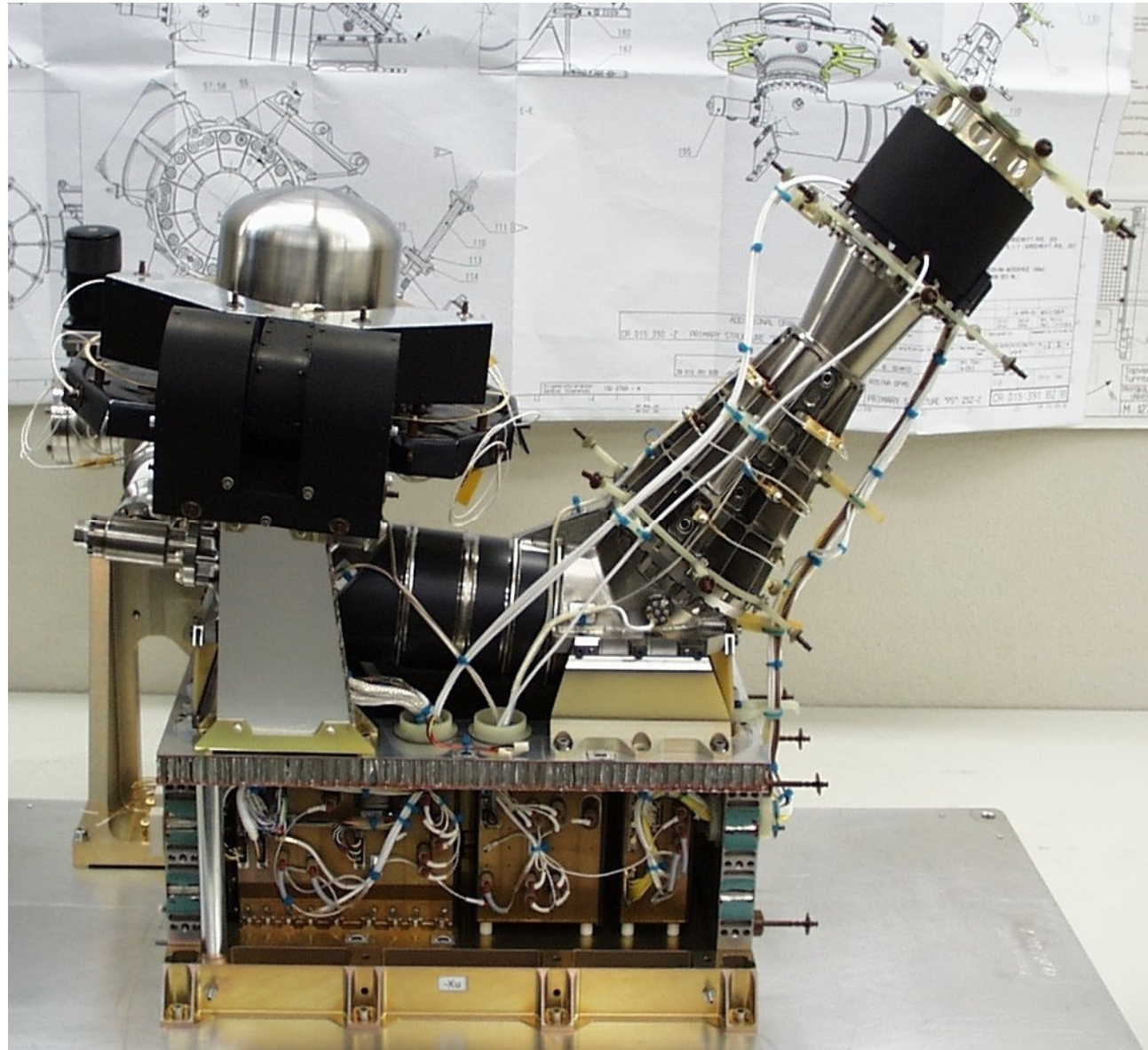
# Double focusing mass spectrometer

## Werkingsprincipe

- Ionisatie
- Versnelling
- Electrostatische filter
- Magnetische filter
- Zoom
- Detector

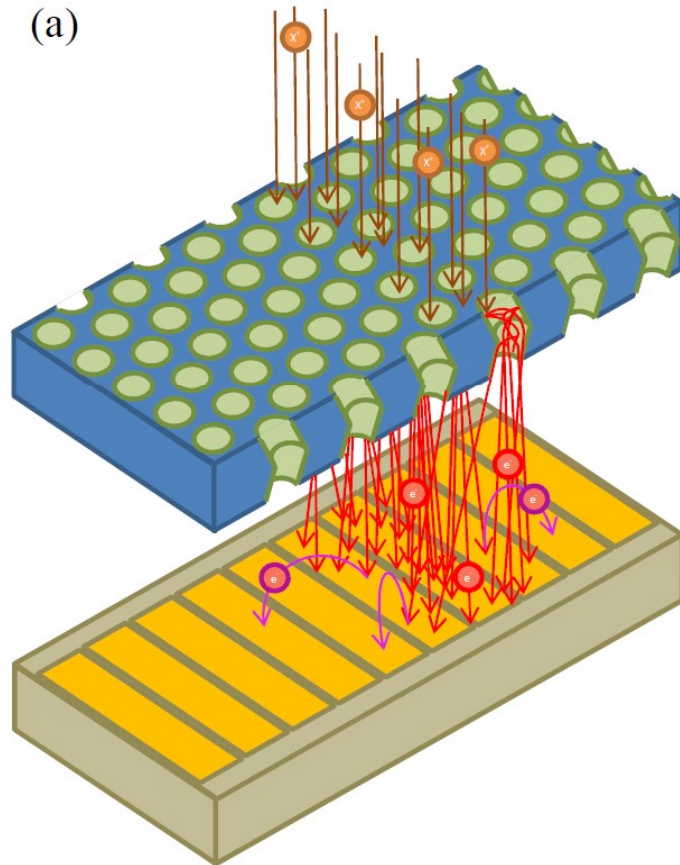




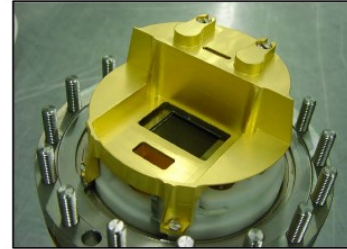




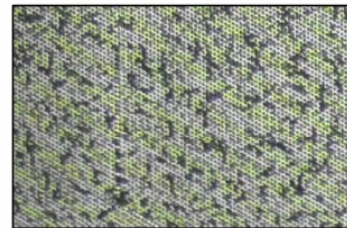
# Detector



(b)



(c)



(d)



- 3 detectoren
- MCP-LEDA

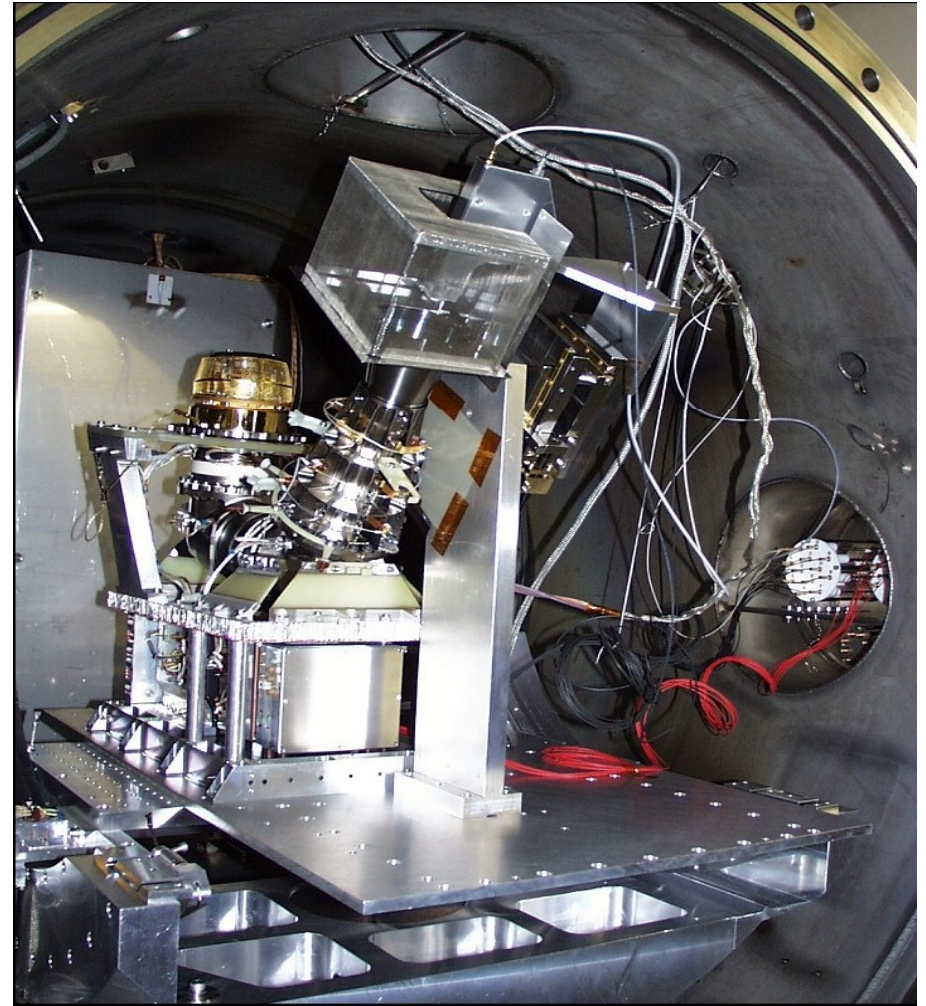




# Calibratie-campagne

Instrumentkopie in  
vacuümopstelling in Bern:

- Bepaling van sensitiviteit voor verschillende gassen
- Bepaling van MCP eigenschappen
- Testen van verschillende instrument-modes

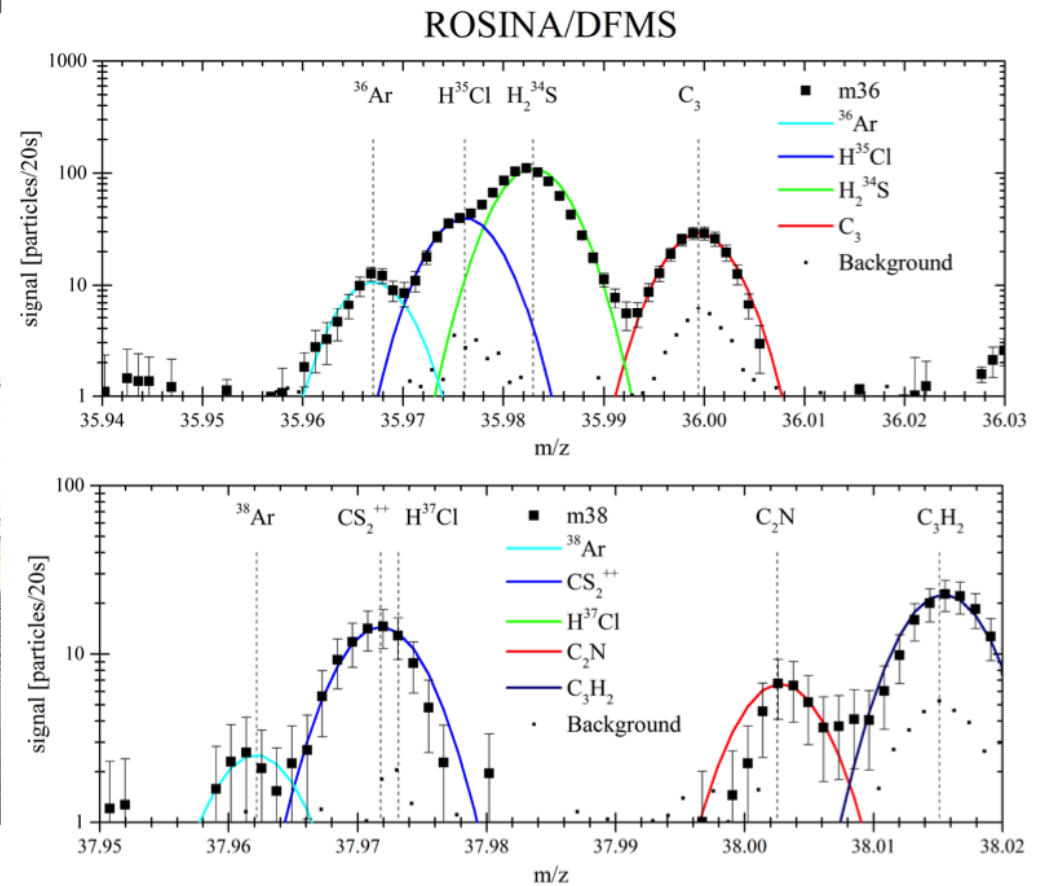
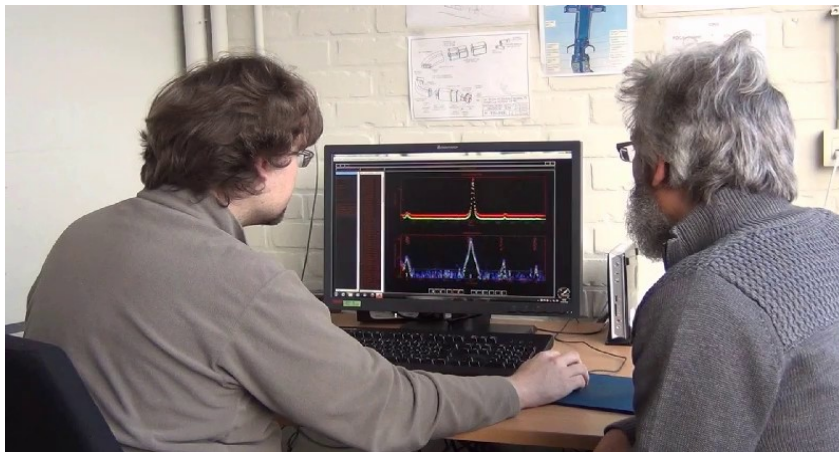




# Analyse van massa-spectra

Ontwikkeling van software

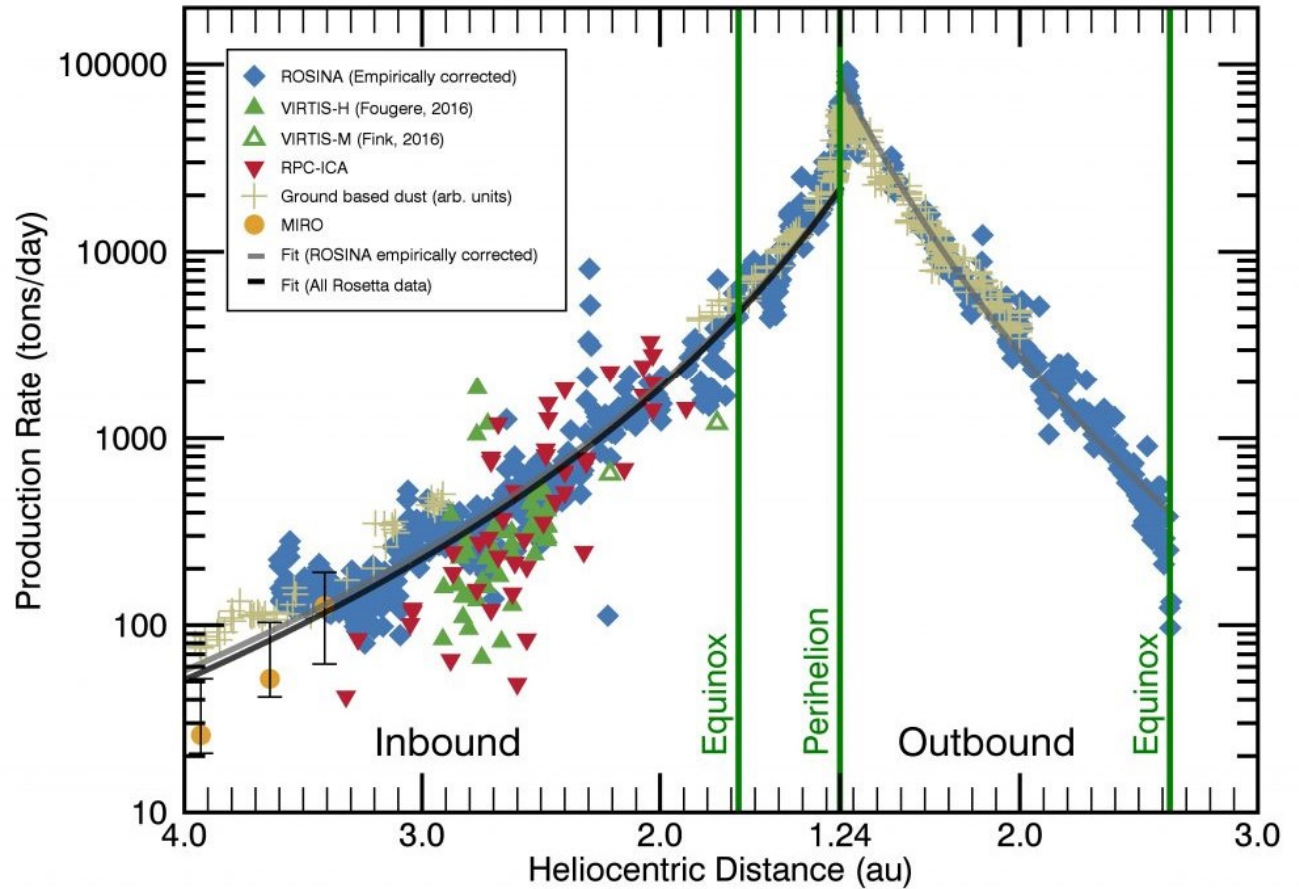
Klemtoon op calibratie-aspecten



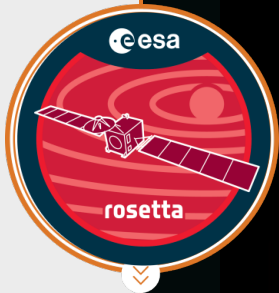


# Wetenschappelijke resultaten

Komeetactiviteit afhankelijk van afstand tot de zon, maar ook van het seizoen.







# → PROFILE OF A PRIMORDIAL COMET



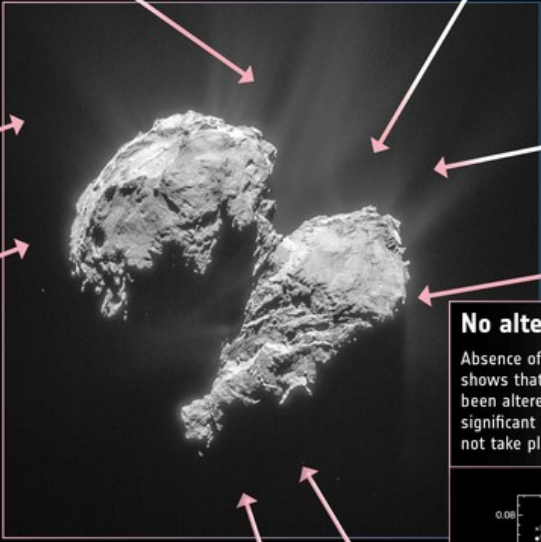
**Positive relief features**  
Spherical 'caps' hint at remnant cometesimals

**Supervolatiles**  
The comet is rich in carbon monoxide, oxygen, nitrogen and argon, suggesting it formed at low temperature and did not experience thermal processing by heat from radioactive decay

**High porosity**  
Nucleus and ejected dust consist of highly porous material, implying low-speed accretion and excluding further high-speed collisional processing

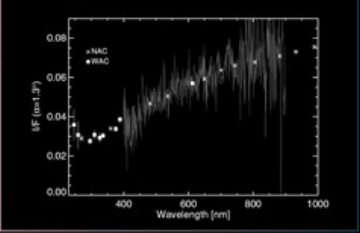


**Goosebumps and clods**  
Internal 'lumpiness' hints at metre-sized cometesimals

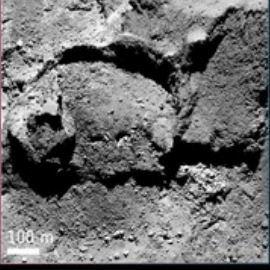


**Layers**  
Extensive layering implies material accumulated over a lengthy period

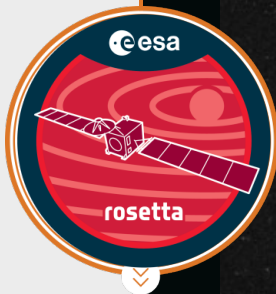
**No alteration by liquid water**  
Absence of an absorption feature at 700 nm shows that minerals in the comet have not been altered by liquid water, implying that significant heating by radioactive decay did not take place



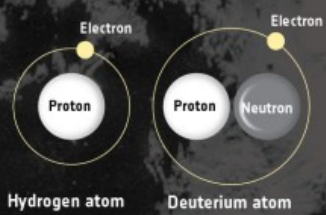
**Low strength**  
Low density, high porosity and weak strength reflect properties of early cometesimals and imply low speed accretion



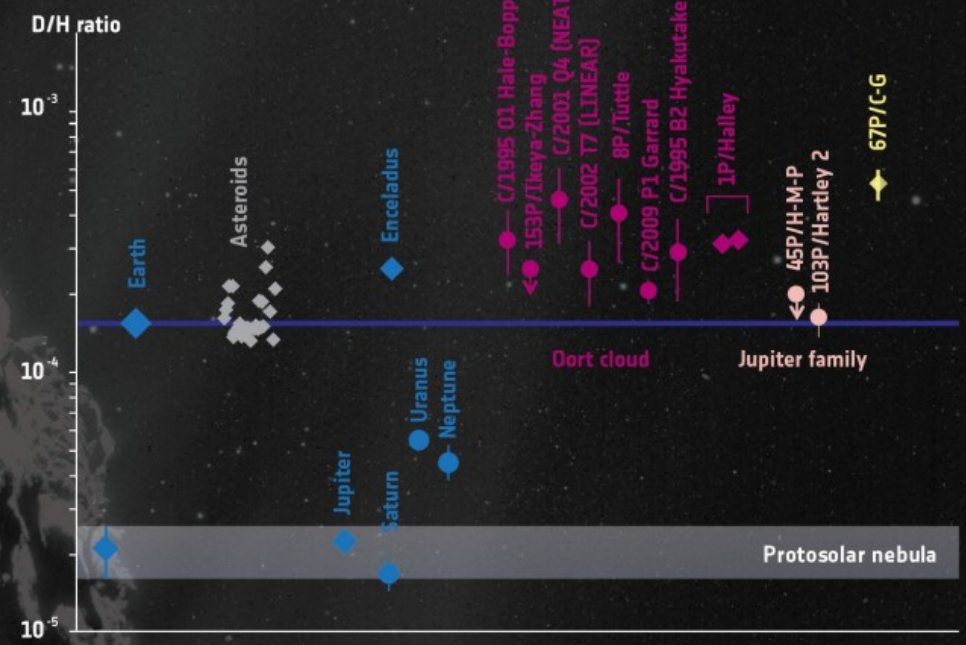
**Two lobes**  
Similar properties of both lobes imply similar evolution, and survival against collision



# Rosetta's ROSINA instrument finds Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko's water vapour to have a significantly different composition to Earth's oceans.

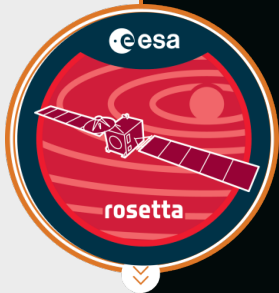


The ratio of deuterium to hydrogen in water is a key diagnostic to determining where in the Solar System an object originated and in what proportion asteroids and comets may have contributed to Earth's oceans



D/H ratio for different Solar System objects, grouped by colour as planets and moons (blue), chondritic meteorites from the Asteroid Belt (grey), comets originating from the Oort cloud (purple) and Jupiter family comets (pink). Comet 67P/C-G, a Jupiter family comet, is highlighted in yellow. ◆ = data obtained in situ ● = data obtained by astronomical methods

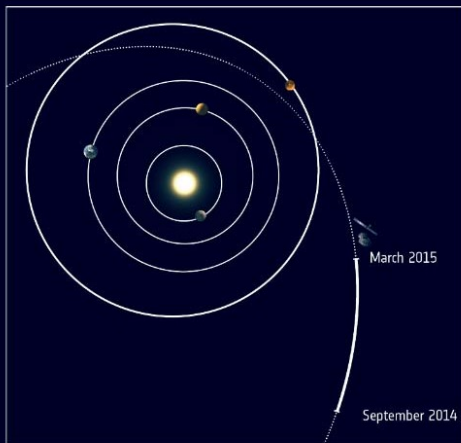




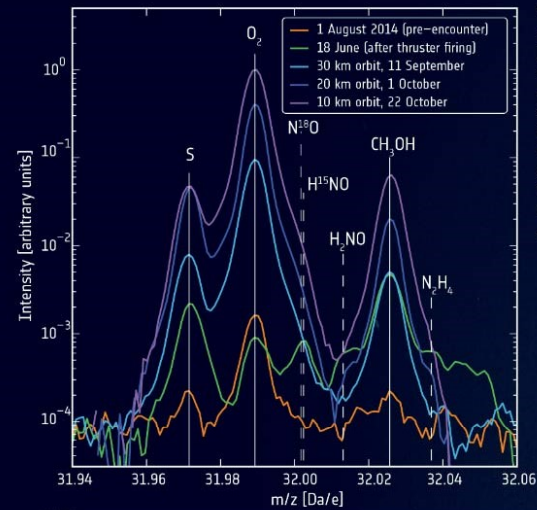
# → ROSETTA HAS MADE THE FIRST DETECTION OF MOLECULAR OXYGEN AT A COMET



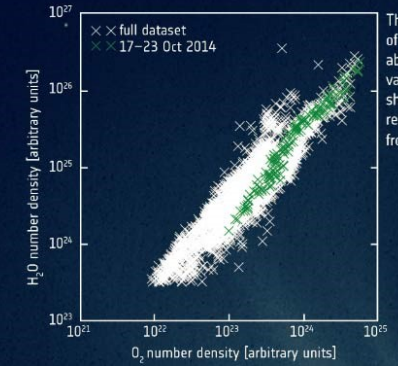
The measurements were made with the Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis Double-Focusing Mass Spectrometer (ROSINA-DFMS).



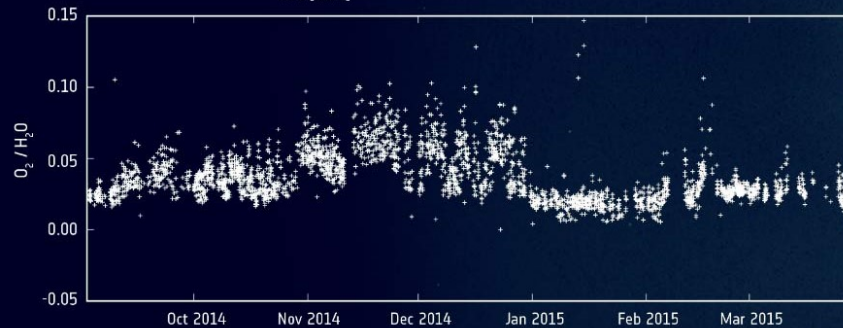
The results were collected between September 2014 and March 2015.



High-resolution measurements allowed molecular oxygen ( $O_2$ ) to be distinguished from other species like sulphur (S) and methanol ( $CH_3OH$ ). The detection of the coma gases is stronger closer to the comet nucleus, as expected. The contribution to the detection from contamination from the spacecraft thruster firings during manoeuvres is very low.

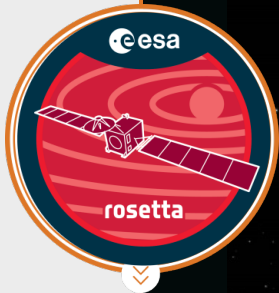


The strong correlation of molecular oxygen abundance with water vapour indicates a shared origin and release mechanism from the nucleus.

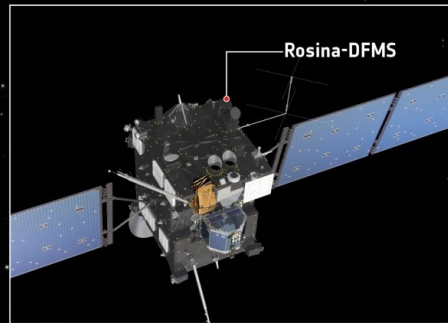


The  $O_2/H_2O$  ratio does not vary significantly over the study period. Short-lived strong variations are attributed to the decrease of the  $O_2$  ratio for occasionally higher  $H_2O$  abundances linked to the daily water-ice cycle. The overall consistent level implies that  $O_2$  is not produced today by solar wind or UV interaction with surface ices, otherwise it would rapidly decrease due to the comet's increased activity. Instead, the  $O_2$  must have been incorporated into the comet's ices during its formation in the early Solar System, and is being released with the water vapour today.

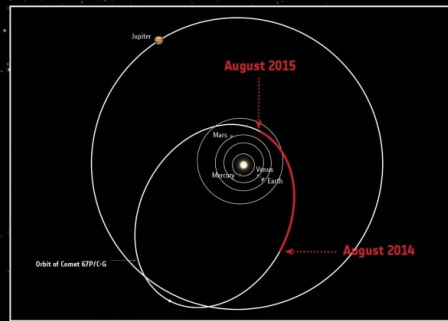




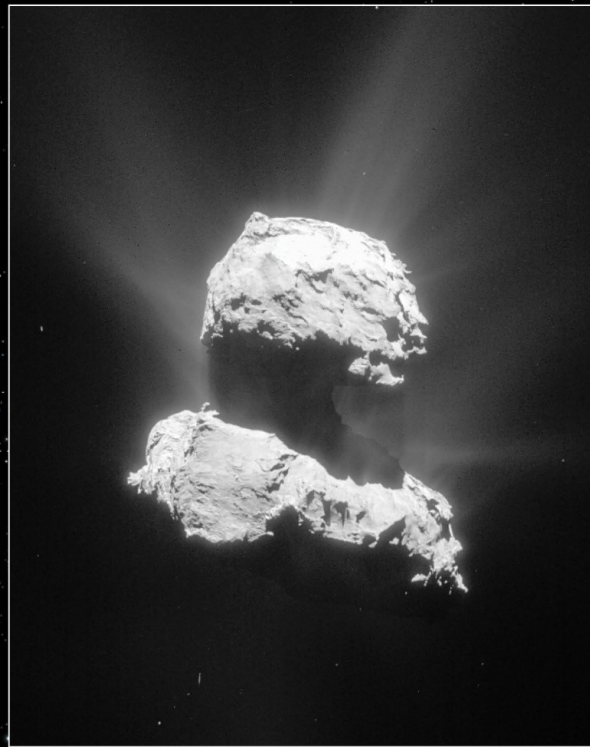
# → ROSETTA'S COMET CONTAINS INGREDIENTS FOR LIFE



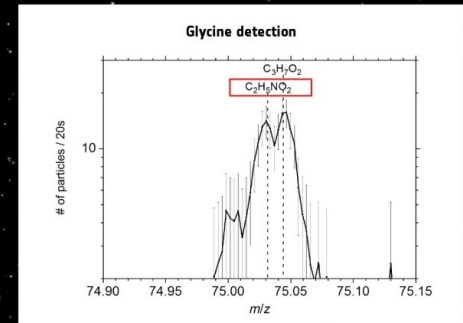
The measurements were made with the Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis Double-Focusing Mass Spectrometer (ROSINA-DFMS).



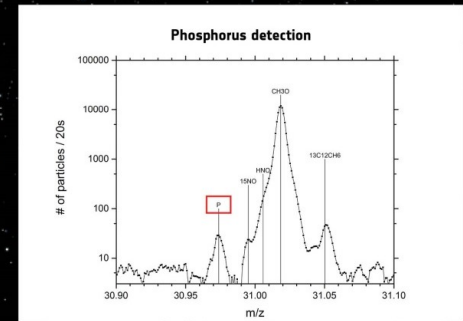
The data were collected between August 2014 and August 2015.



The measurements were made when Rosetta was between 10 and 200 km from the comet.



Spectrum indicating glycine [ $C_2H_5NO_2$ ] detection on 9 July 2015. The simple amino acid glycine is a biologically important organic compound commonly found in proteins.



Spectrum indicating phosphorus [P] detection, along with other gases, on 26 October 2014. Phosphorus is a key element in all living organisms. It is found in DNA, RNA and in cell membranes, and it is used in transporting chemical energy within cells for metabolism.



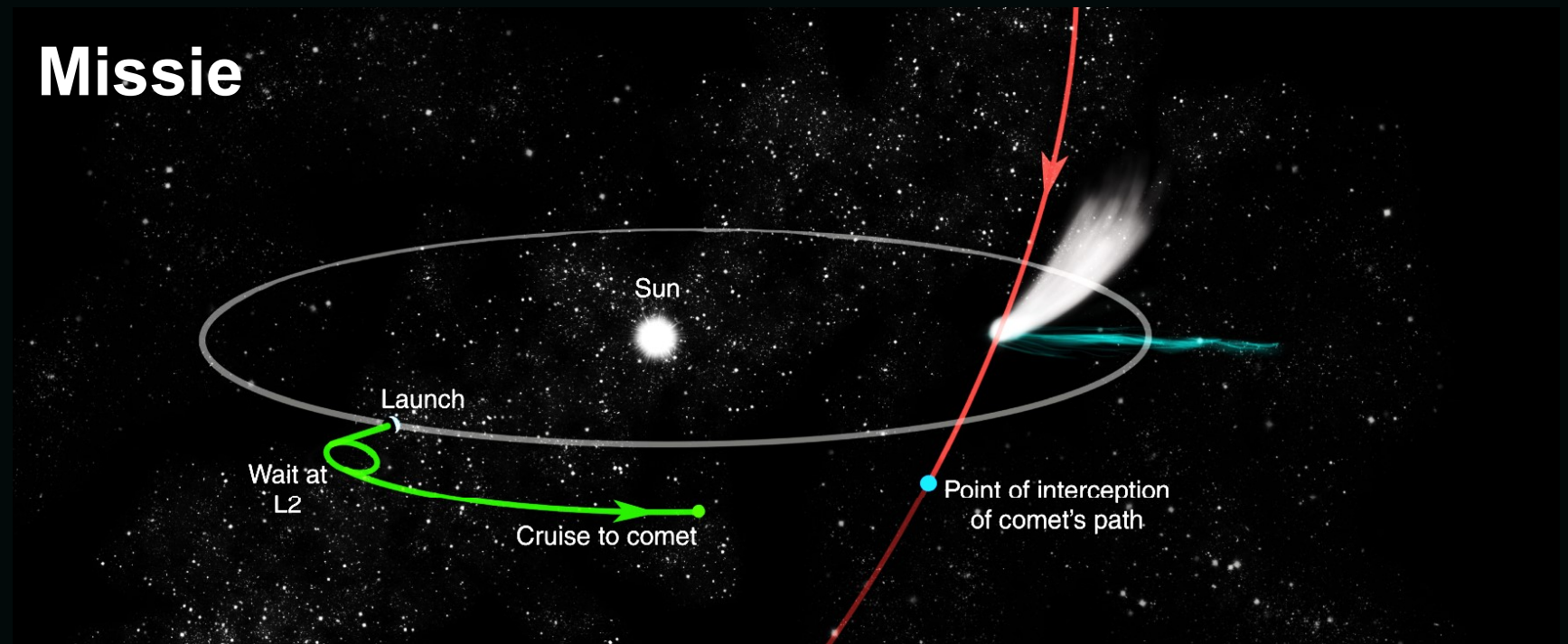
# Comet Interceptor

- Flyby van een dynamisch nieuwe komeet
- Of een interstellair object
- Of een backup doelwit



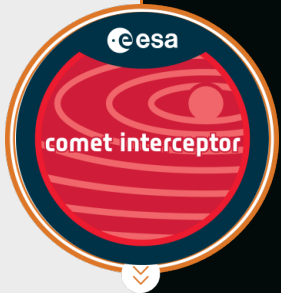


# Missie



Comet Interceptor is ESA's F1 missie naar een *nieuwe* komeet.

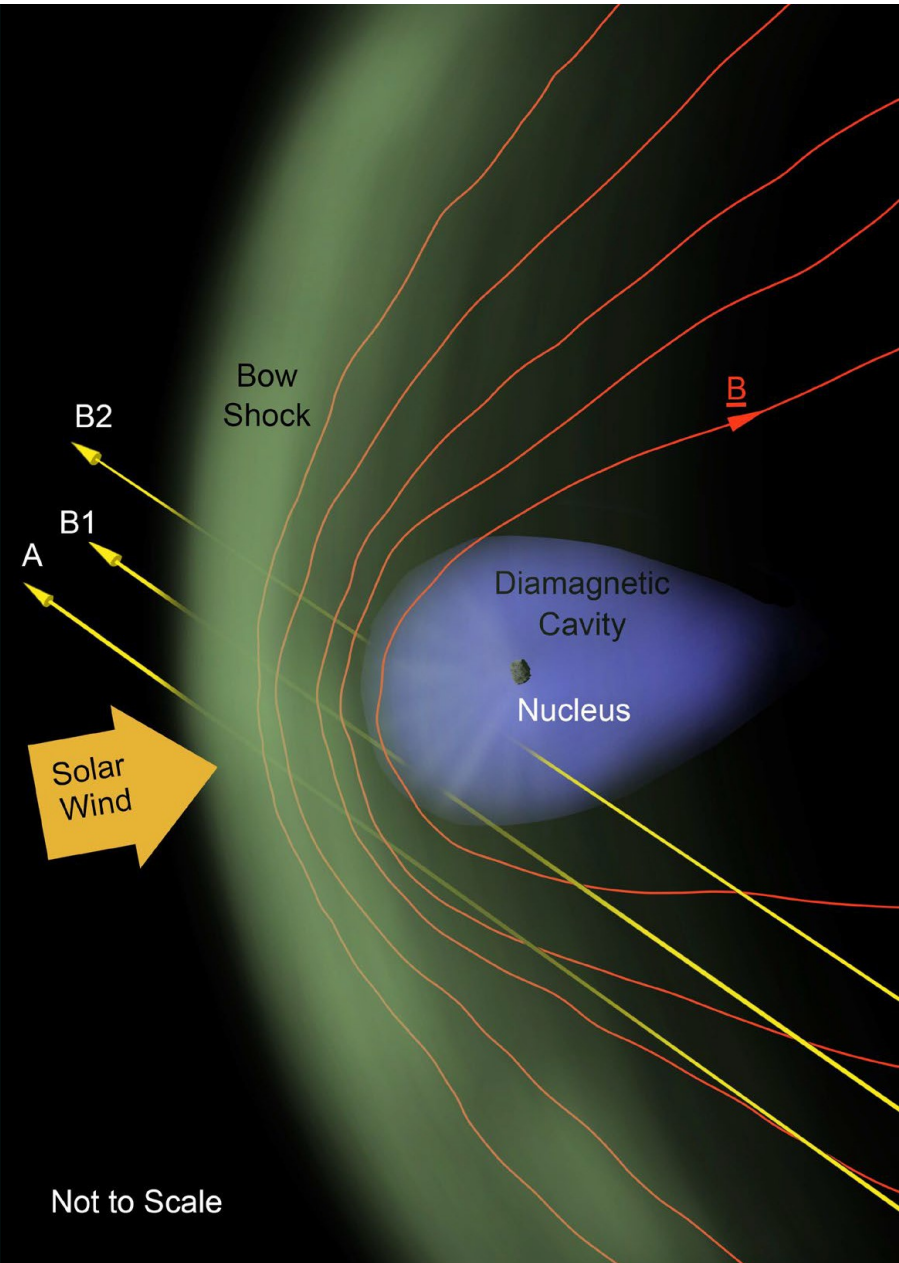
- Gelanceerd samen met Ariel in 2029 op Ariane 6
- Wacht 1-3 jaar op L2
- Cruise 1-2 jaar naar ontmoetingspunt rond 1 ae
- Flyby aan een relatieve snelheid van 10-80 km/s

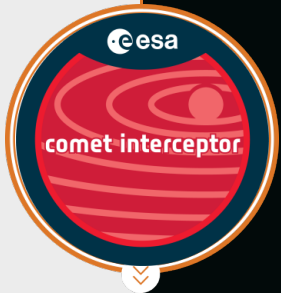


## Doelstellingen

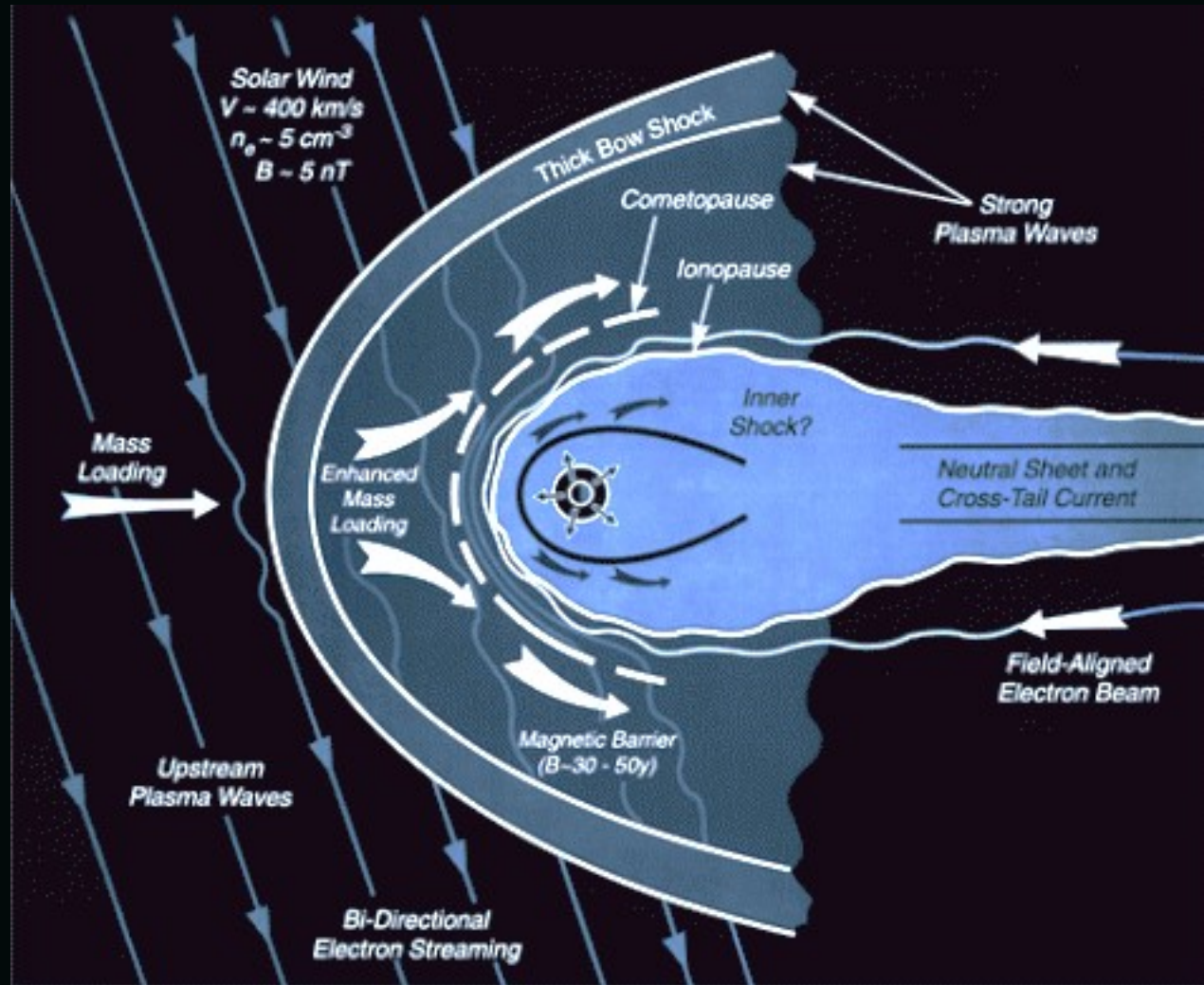
Rosetta bestudeerde 67P in detail. Maar hoe representatief is 67P? Zoals alle kortperiodieke kometen heeft 67P al een zekere evolutie ondergaan bij elke passage langs de Zon. Wat met een dynamisch nieuwe komeet? Wat met interstellaire bezoekers?

Kunnen we een globaal beeld krijgen van de komeetomgeving? Multi-point/multi-instrument metingen van stof, gas, plasma zijn daarvoor nodig.

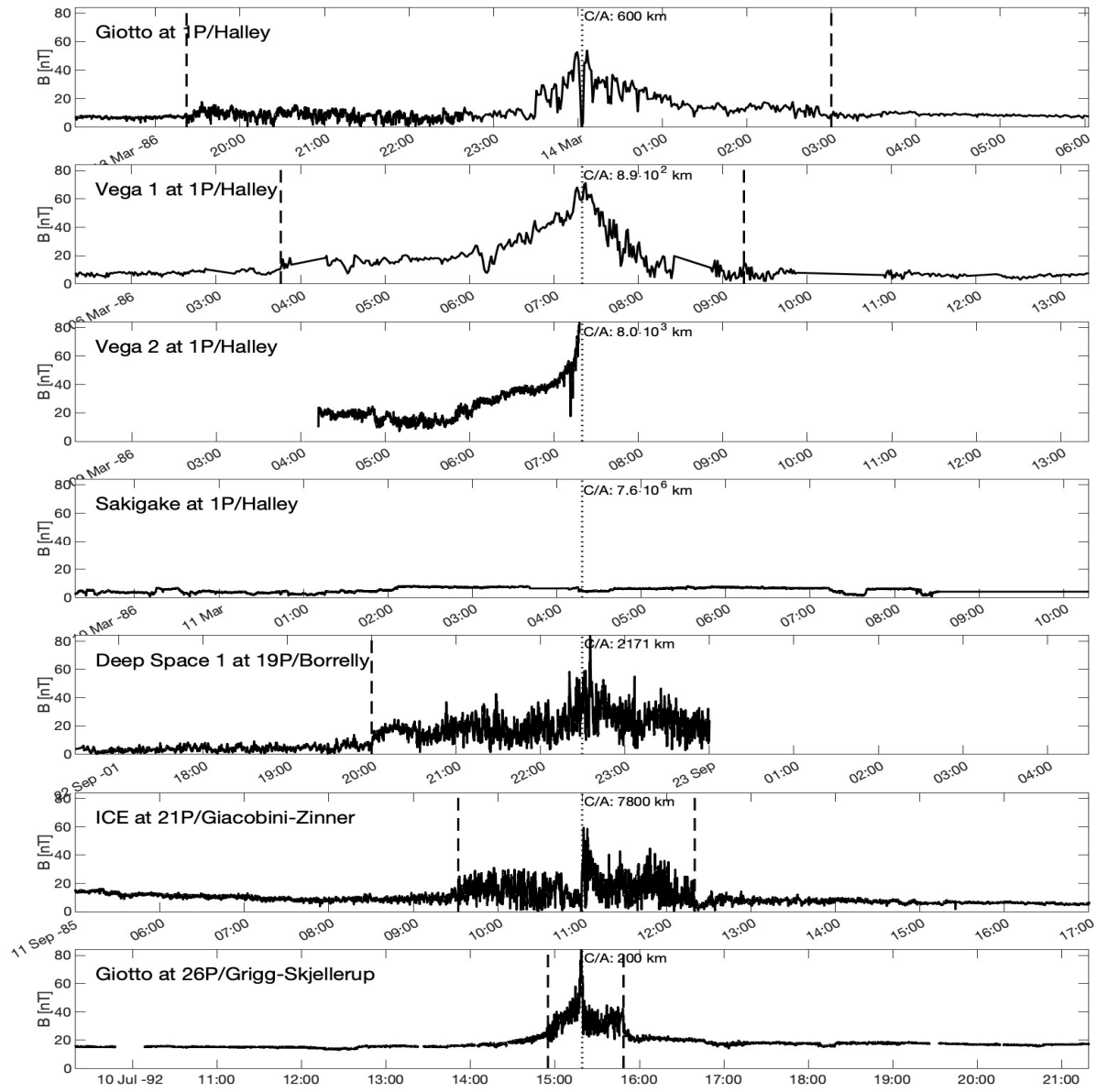


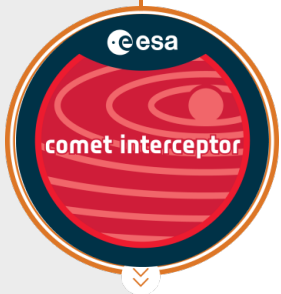


# Kometmagnetosfer



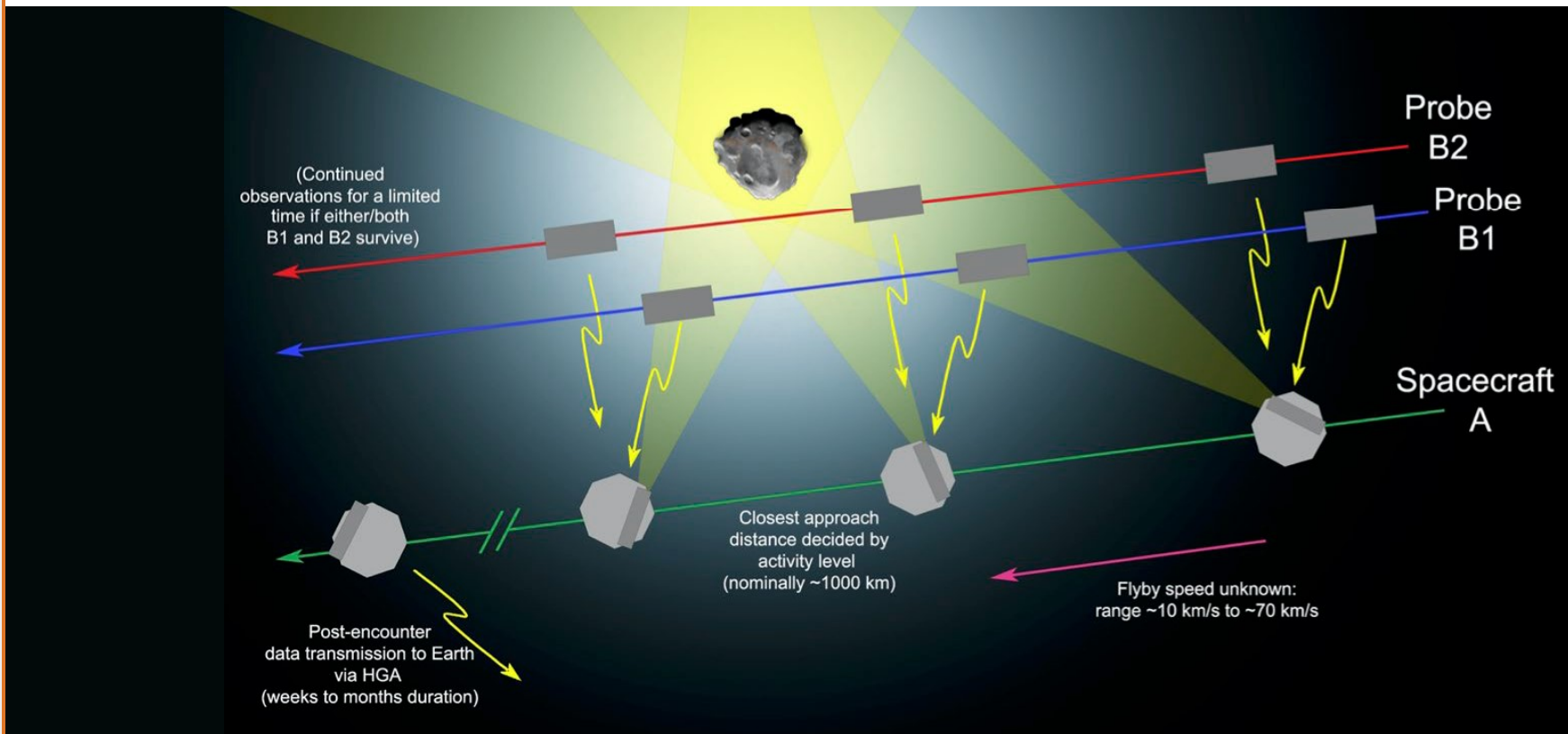


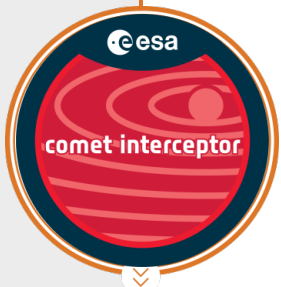




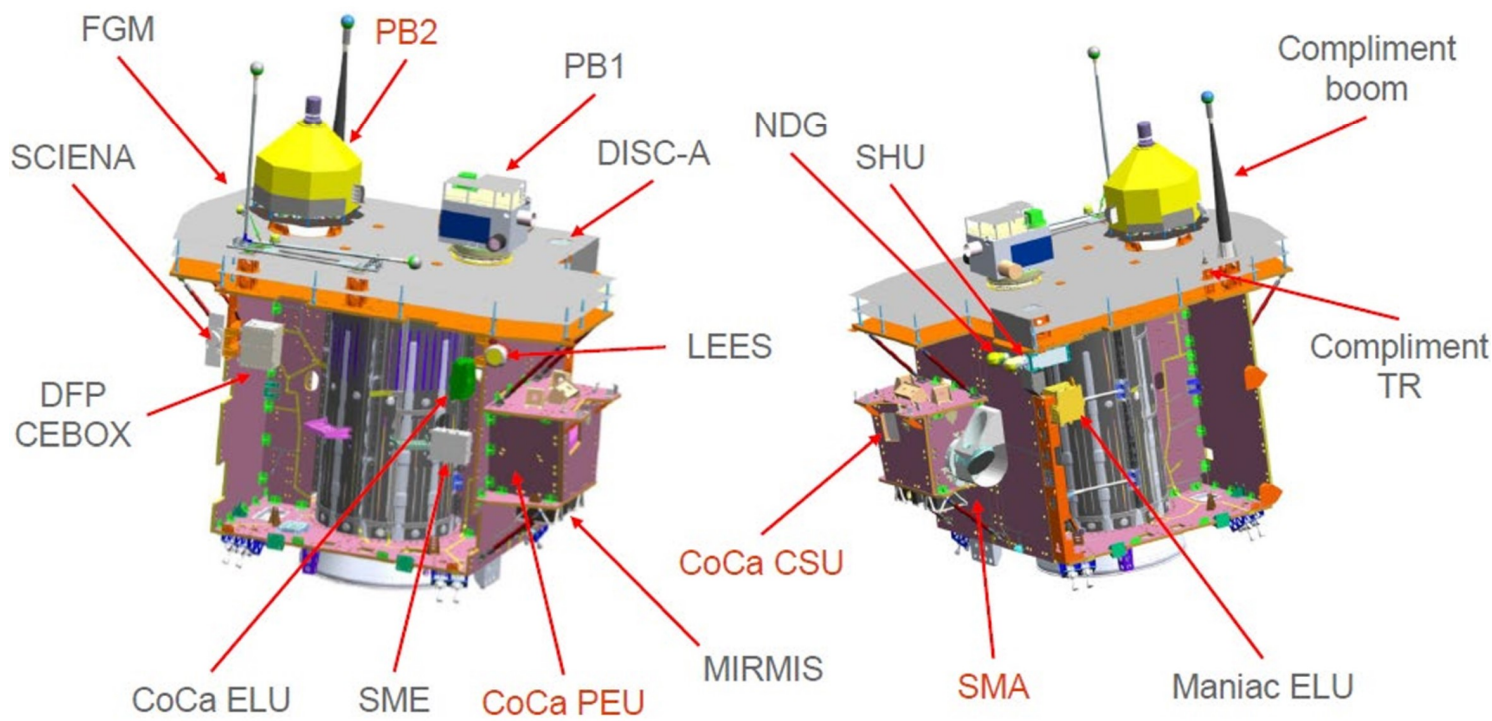
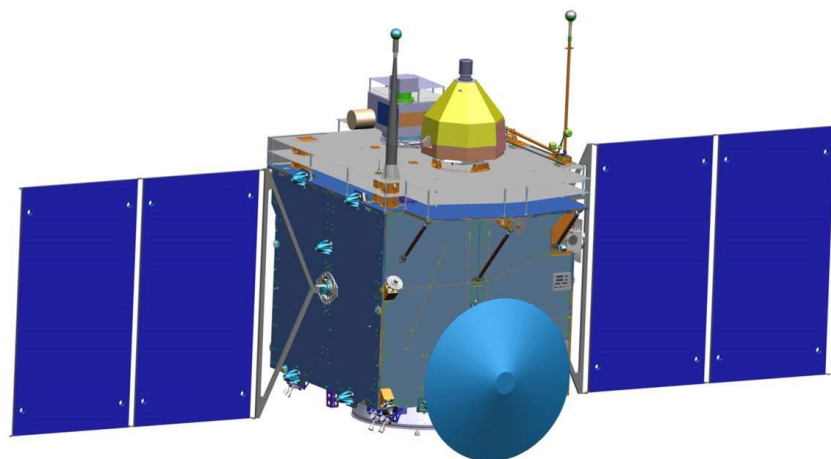
# Flyby

- Sonde A (ESA) + dochter B1 (JAXA) + dochter B2 (ESA)
- Grondsegment (LSST, ESA VLT, TRAPPIST, ...)

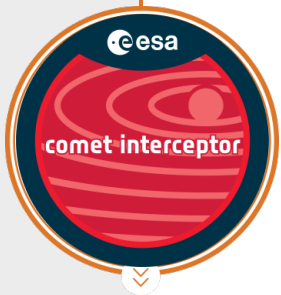




# Instrumenten





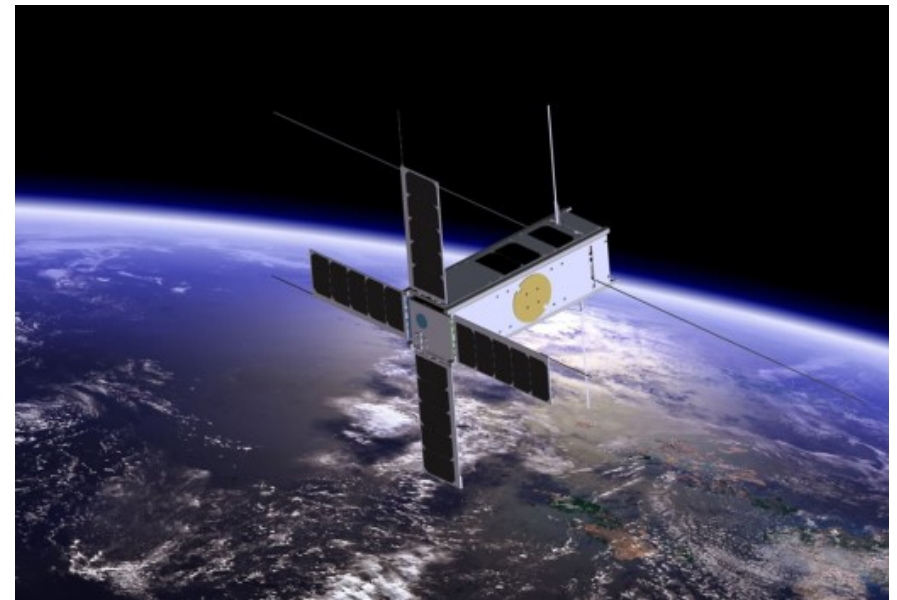


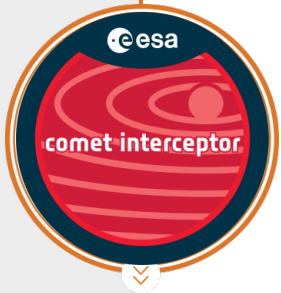
## De COMPLIMENT sensor

De COMPLIMENT sensor maakt deel uit van het Dust-Fields-Plasma instrument. Het bestaat uit 2 sferische probes + 1 transmitter

COMPLIMENT gebruikt “Langmuir probes”. Die kunnen verschillende vormen en groottes hebben, afhankelijk van de Debye lengte.

De PICASSO cubesat vliegt in de dichte ionosfeer (kleine Debye lengte) zodat dunne cilindertjes kunnen worden gebruikt. Op COMPLIMENT zijn het 8-cm diameter sferen.





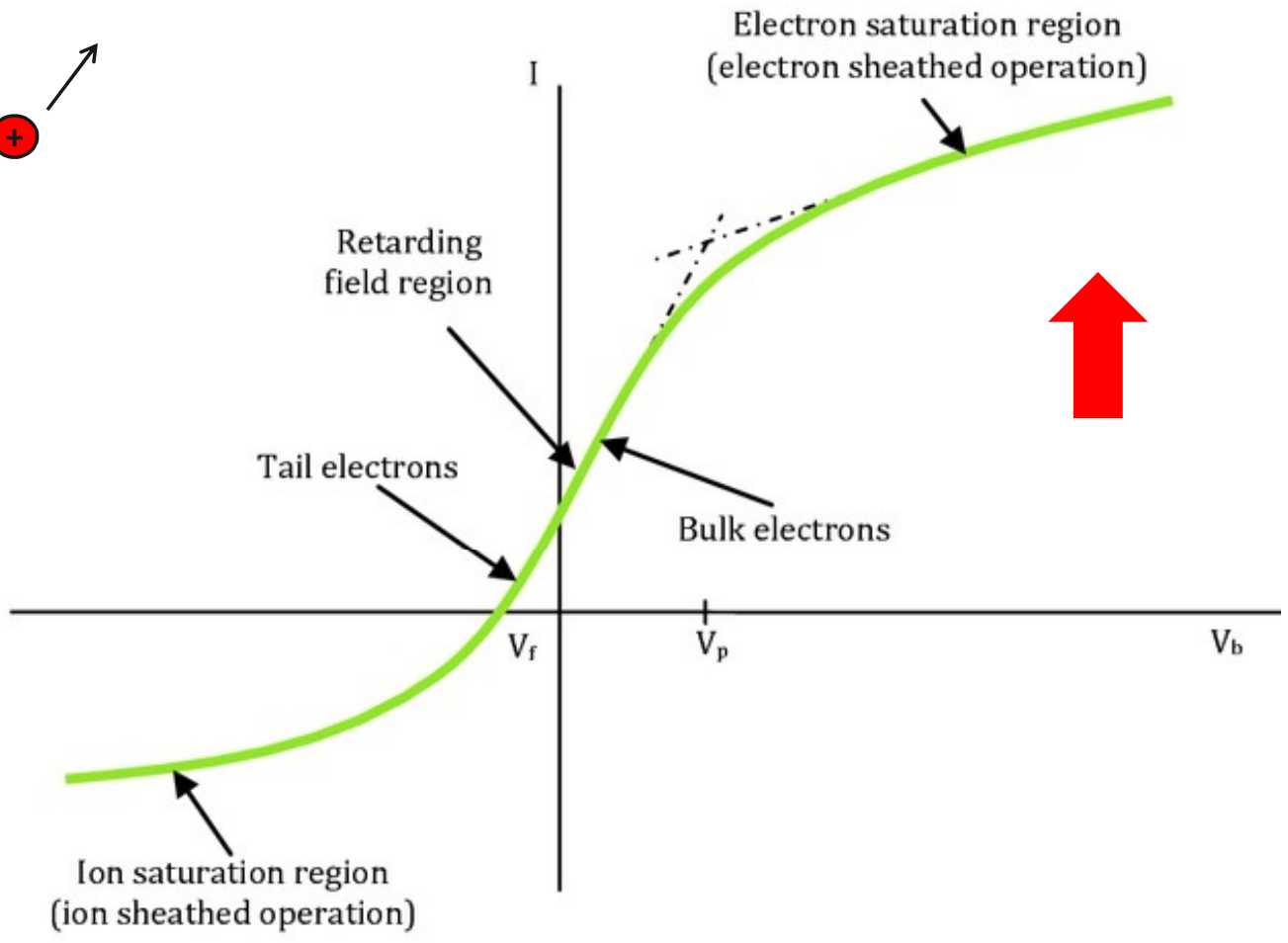
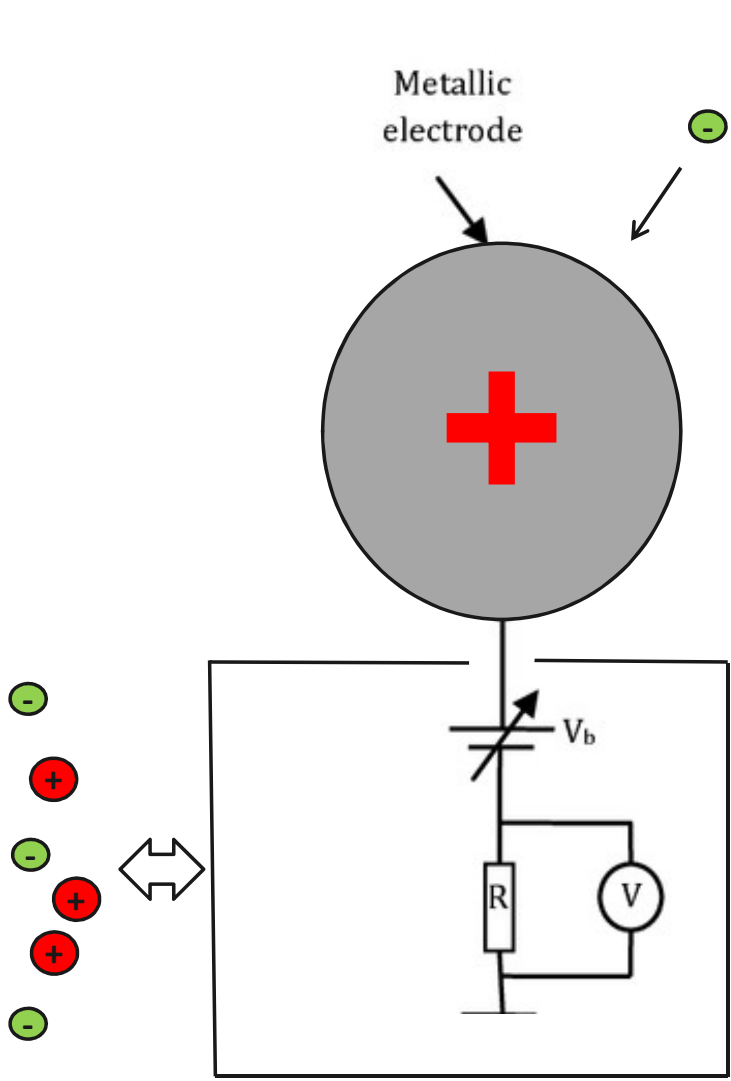
## Werking van een Langmuir probe

Een Langmuir probe is het eenvoudigst denkbare elektrische experiment op een satelliet. Ingrediënten:

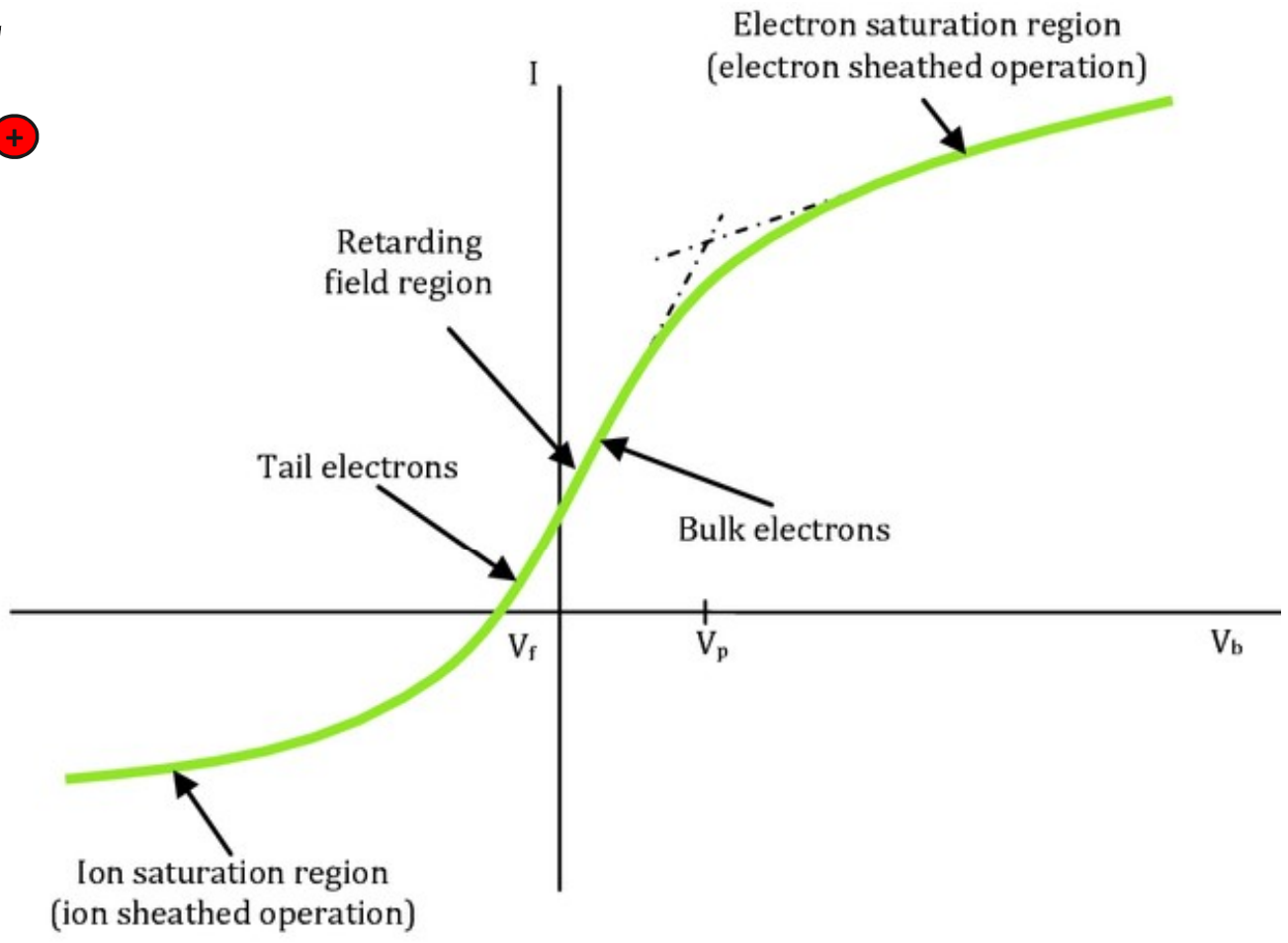
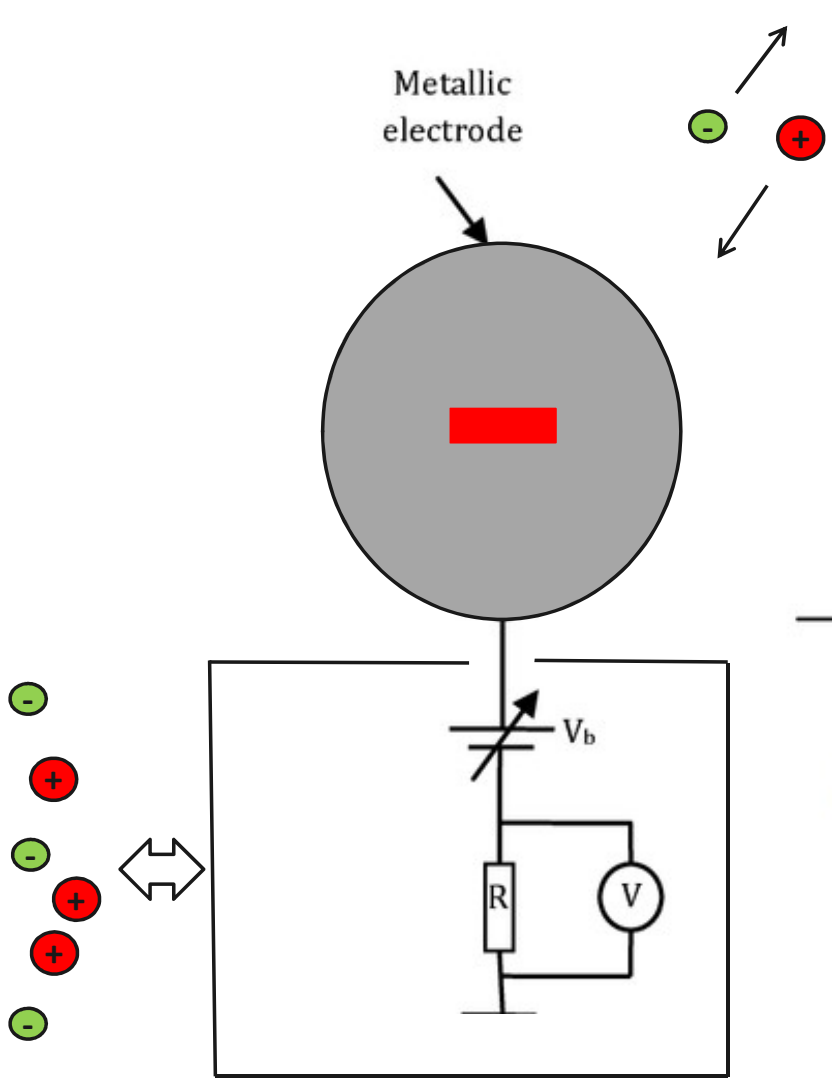
- Een elektrode die in de ruimte steekt.
- Het buitenoppervlak van de sonde vormt een tweede, veel grotere elektrode.

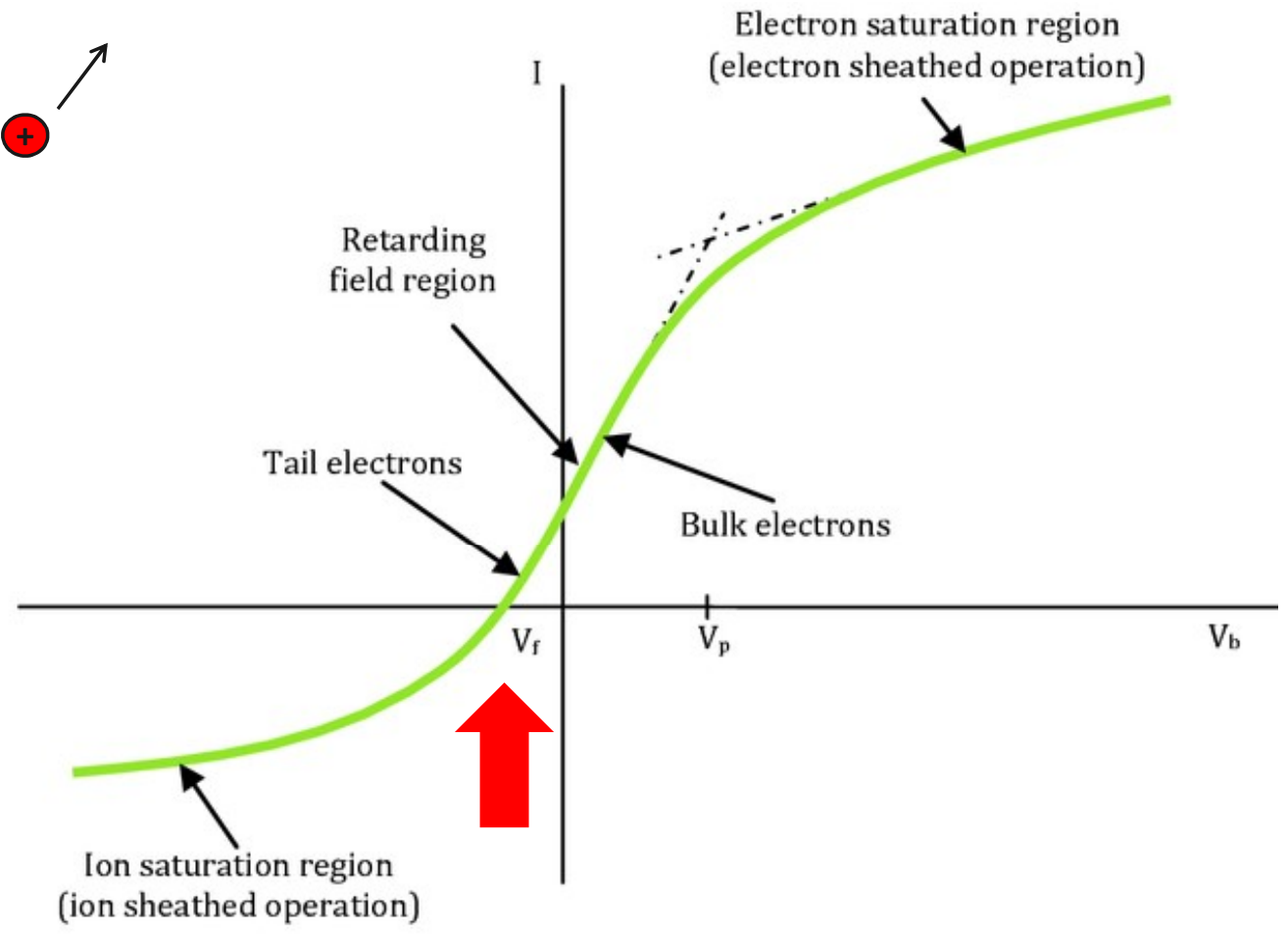
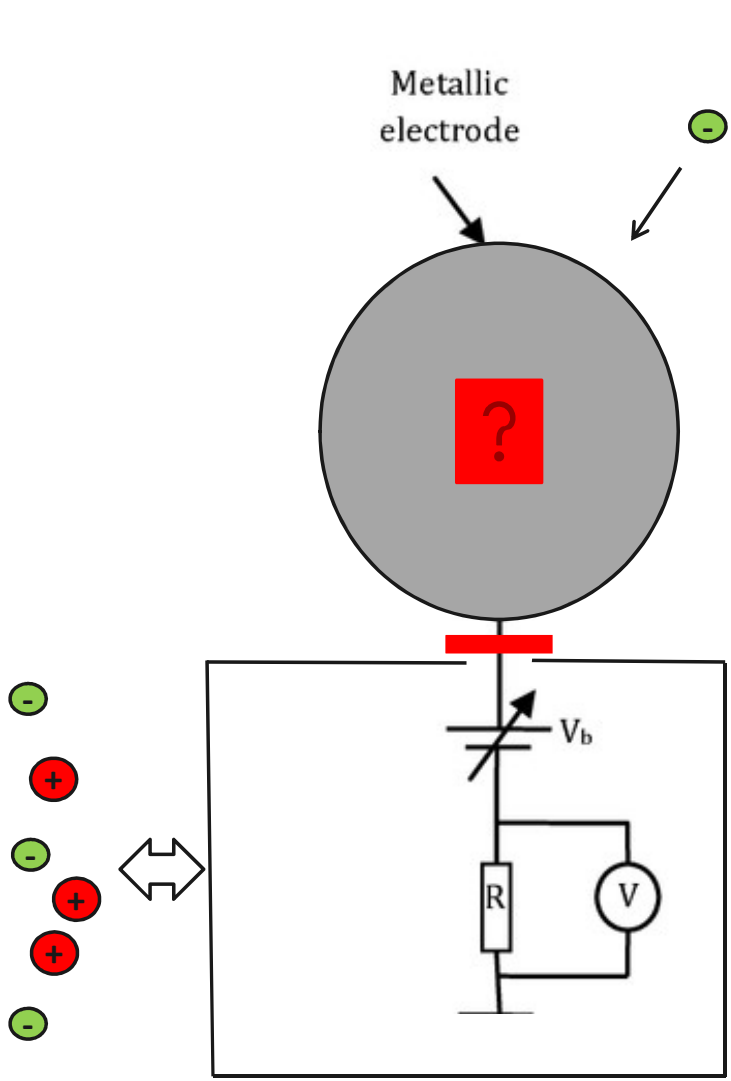
Op het oppervlak van de elektrodes ontstaat een evenwicht tussen

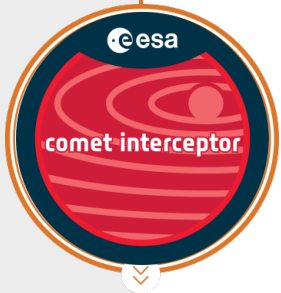
- Geladen deeltjes die op de elektrode botsen
- Geladen deeltjes die uitgezonden worden (bv. foto-elektronen)
- Dit evenwicht wordt gemoduleerd door het spanningsverschil tussen de elektrode en de ruimte.











## Type metingen

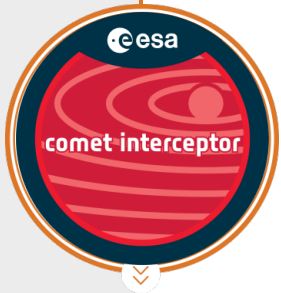
Uit de I-V curve kan met plasma parameters bepalen, en de ruimtetuig-potentiaal.

Uit het verschil in vlottende spanning van 2 probes op een zekere onderlinge afstand volgt het elektrisch veld in die richting.

Door deze metingen op hoge frequentie te doen detecteert men natuurlijk uitgezonden elektrostatische golven.

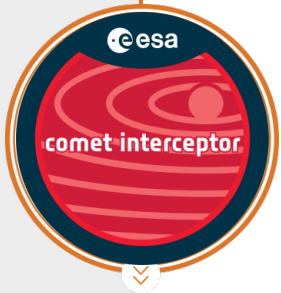
COMPLIMENT heeft ook een zendantenne die actief golven in het plasma kan opwekken, die door de probes kunnen worden gemeten.





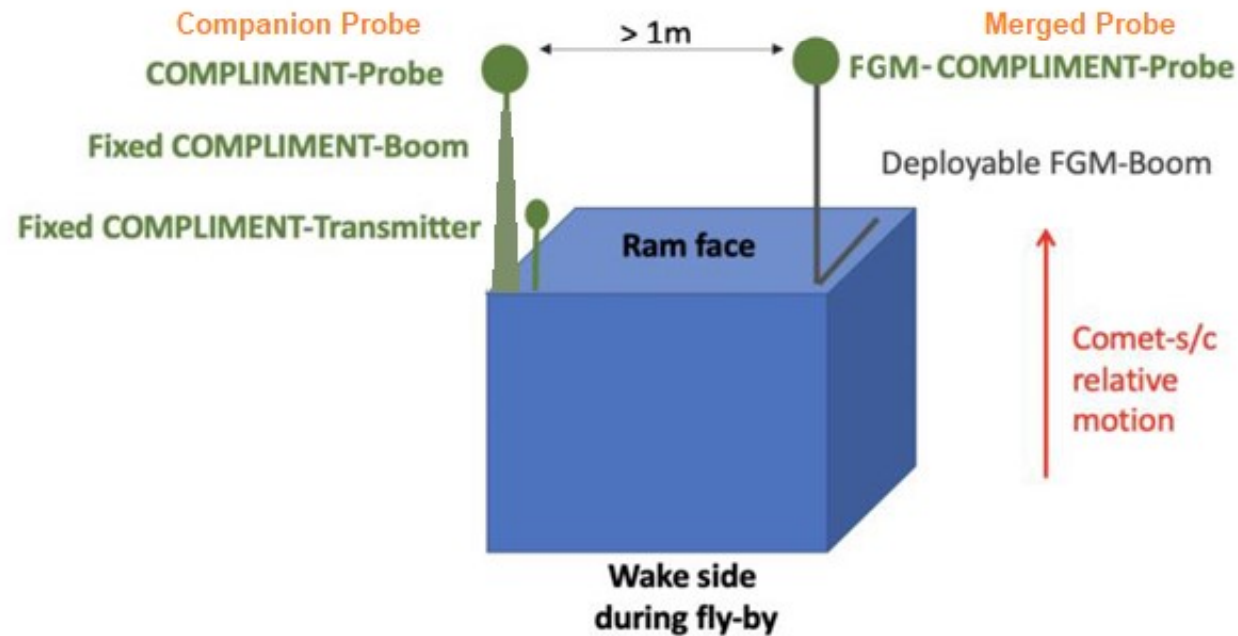
## Consortium

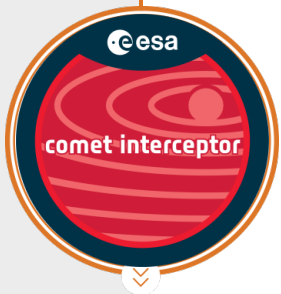
- P. Henri – LPC2E Orléans – Lead + High-frequency measurements electronics + transmitter
- N. Edberg – IRF-U Uppsala – Low-frequency measurements electronics
- J. De Keyser – BIRA-IASB Brussels – Probe assemblies
- J. Peterson – IRF-K Kiruna – Fixed boom
  
- U. Auster – TU Braunschweig – Magnetometer and deployable boom



## Configuratie

- 3 → 2 booms dankzij merged sensor
- Minder massa, minder volume, minder obstructie
- Eenvoudiger interface met de satelliet
- Beter control over interferentie tussen FGM en COMPLIMENT



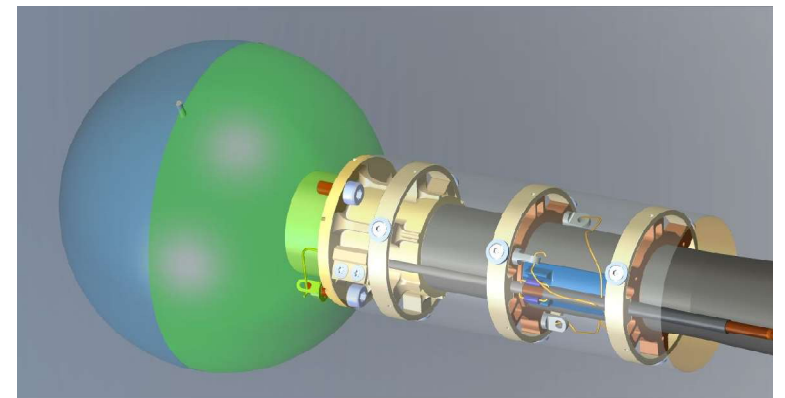
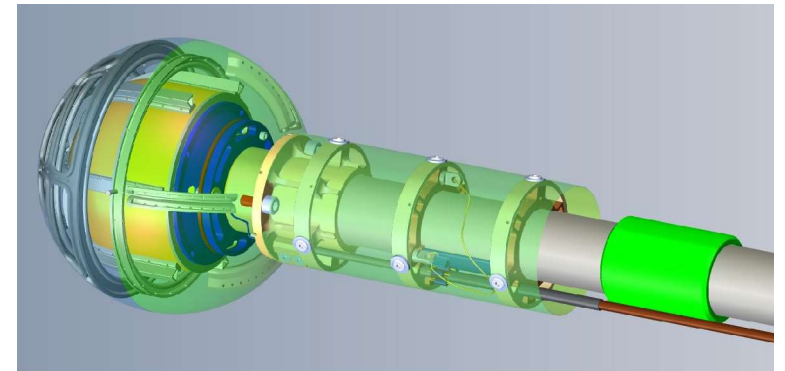
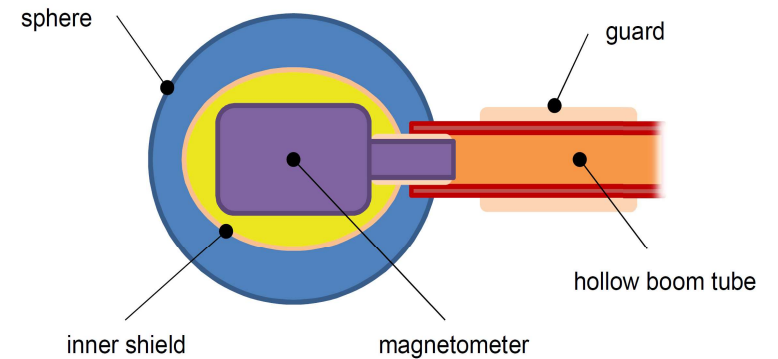


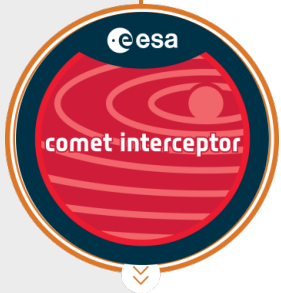
## Sensor

Elke sensor heeft een diameter van 8 cm.

- (a) Een “merged probe” met FGM binnenin. Een geleidend “schild” tussen beide beperkt interferentie.
- (b) Een “companion probe”, identiek maar zonder magnetometer en schild.

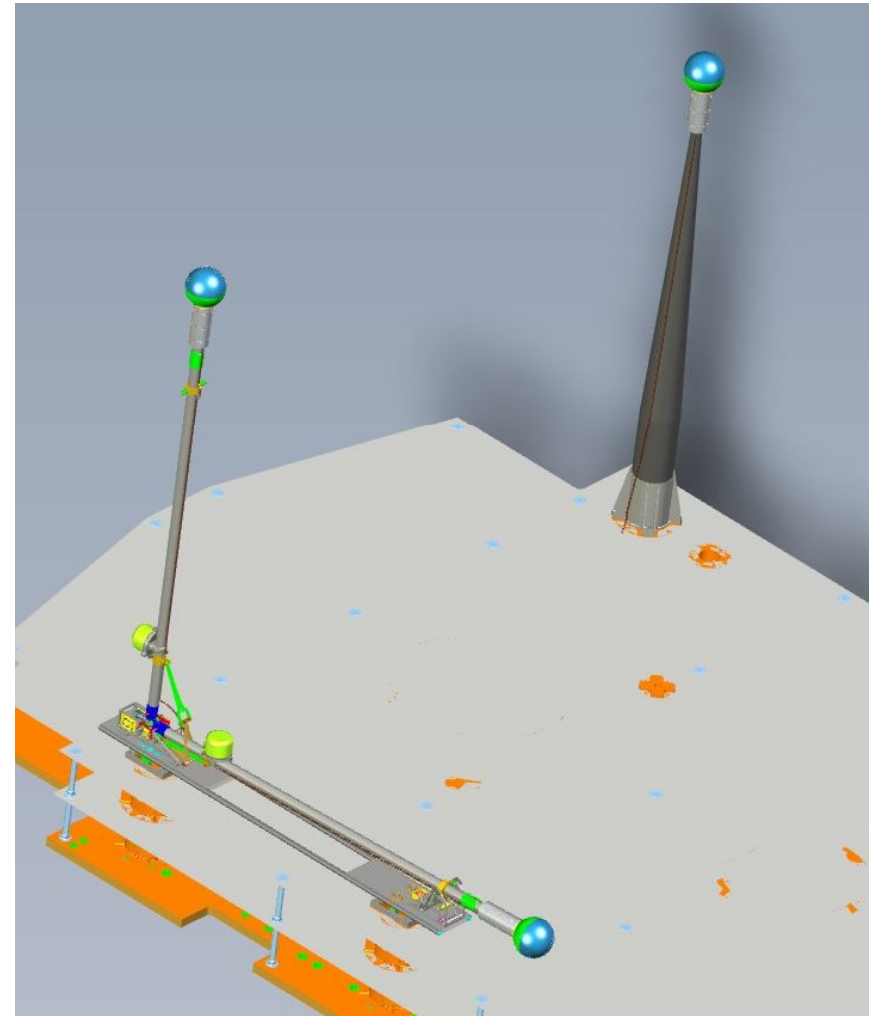
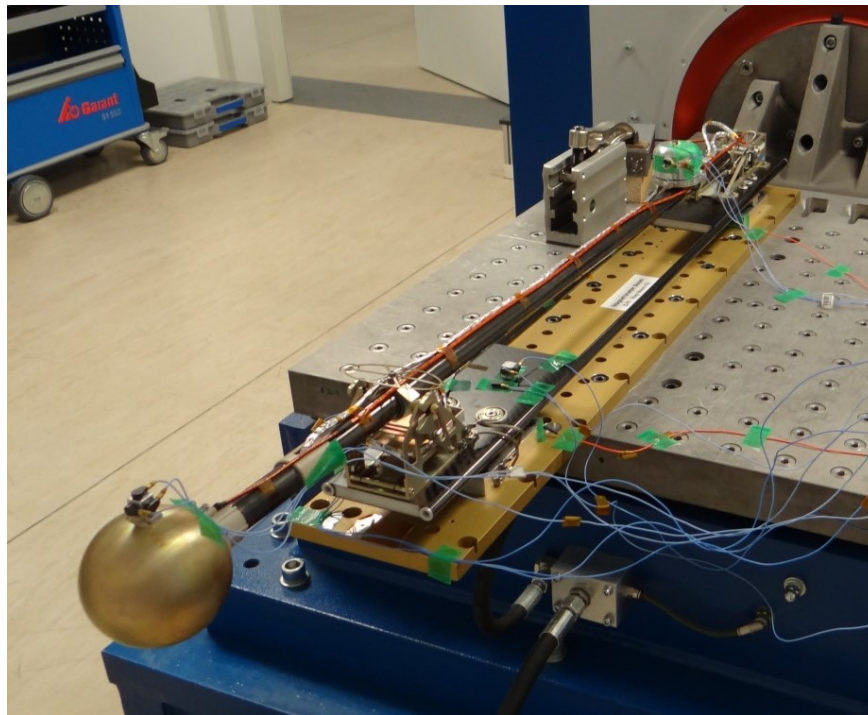
De bollen zijn gemaakt uit Al, slechts 0.3 mm dik.



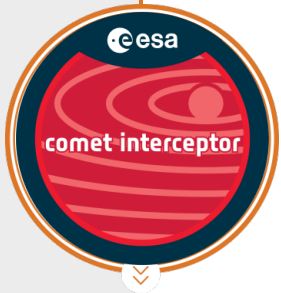


# Booms

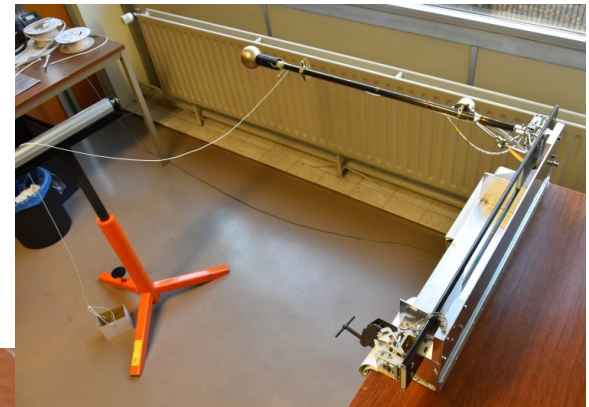
Merged sensor: openplooibaar  
Companion sensor: vast

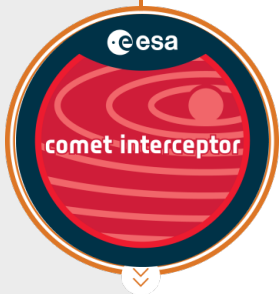






# Integratie prototype

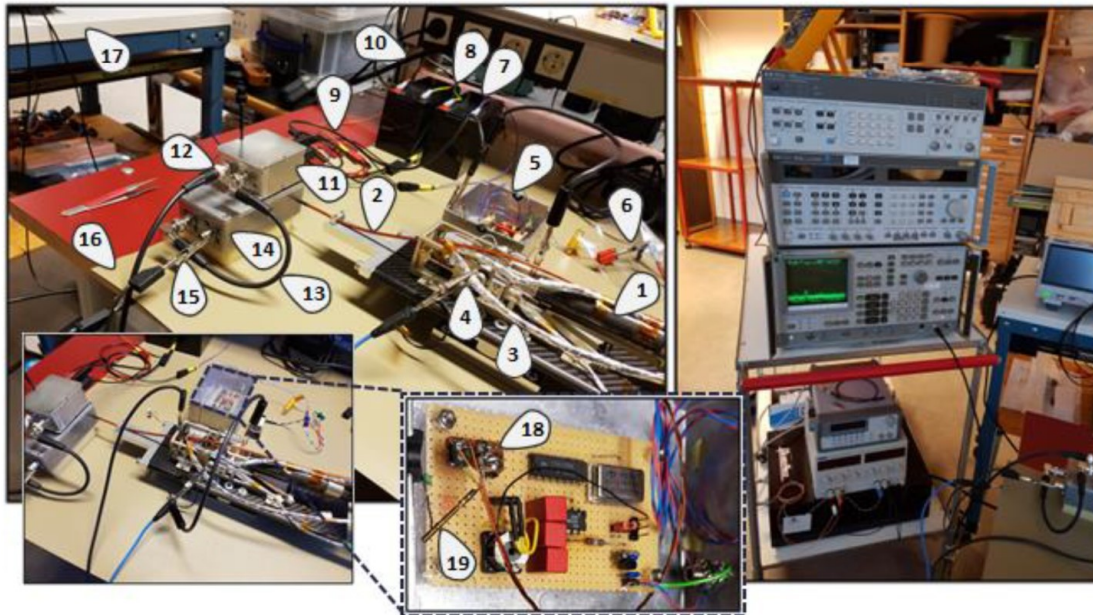




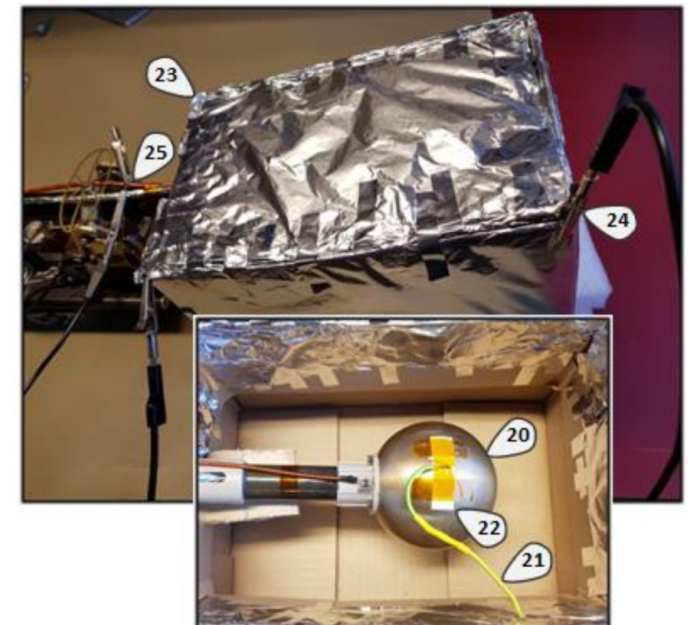
# Interferentie van FGM op COMPLIMENT

Elektrische testen werden uitgevoerd om de interferentie tussen FGM en COMPLIMENT te karakteriseren.

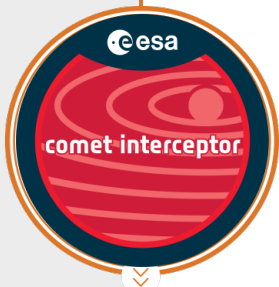
Uitrusting aan de voet van de boom



Faraday kooi & probe aan de tip



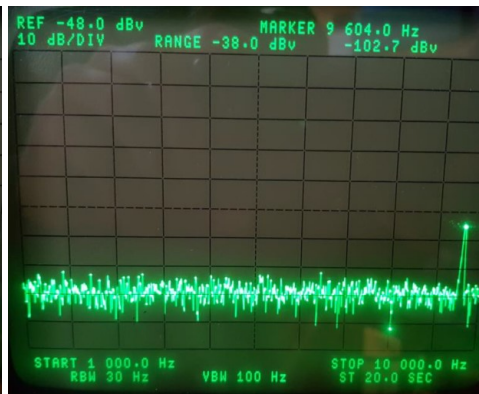




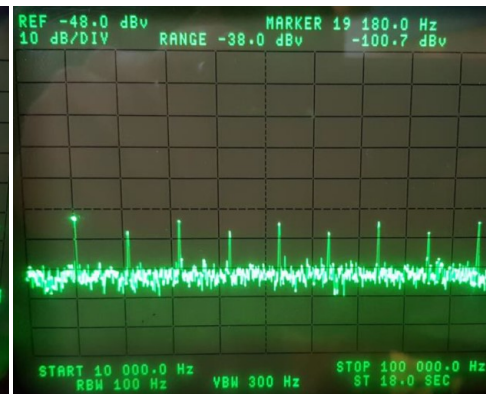
1-300 Hz



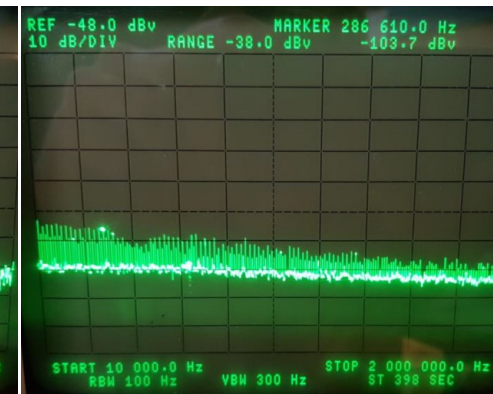
1-10 kHz



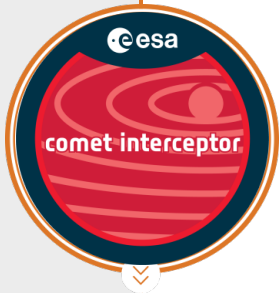
10-100 kHz



10 kHz – 2 MHz



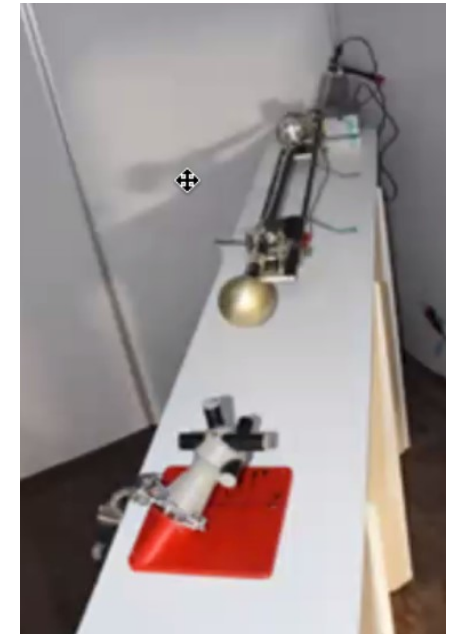
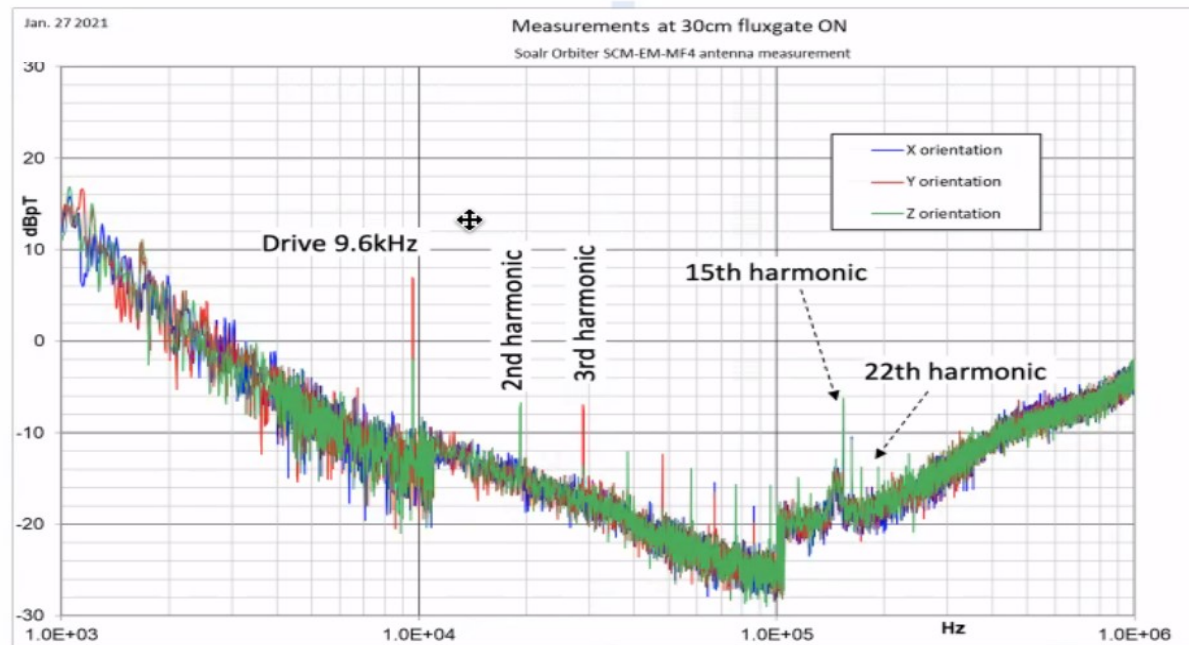
FGM driver op 9.6 kHz is te zien + harmonischen  
De interferentie is sterk gereduceerd door het “schild”  
Harmonischen zijn scherp, op welbepaalde frequenties, en dus te verwijderen a posteriori.



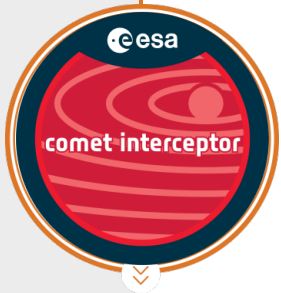
# Magnetische testen

Magnetische karakterisering werd ook uitgevoerd, met het Solar Orbiter SCM engineering model.

- Intensiteit neemt af met de afstand
- Harmonischen worden gedempt

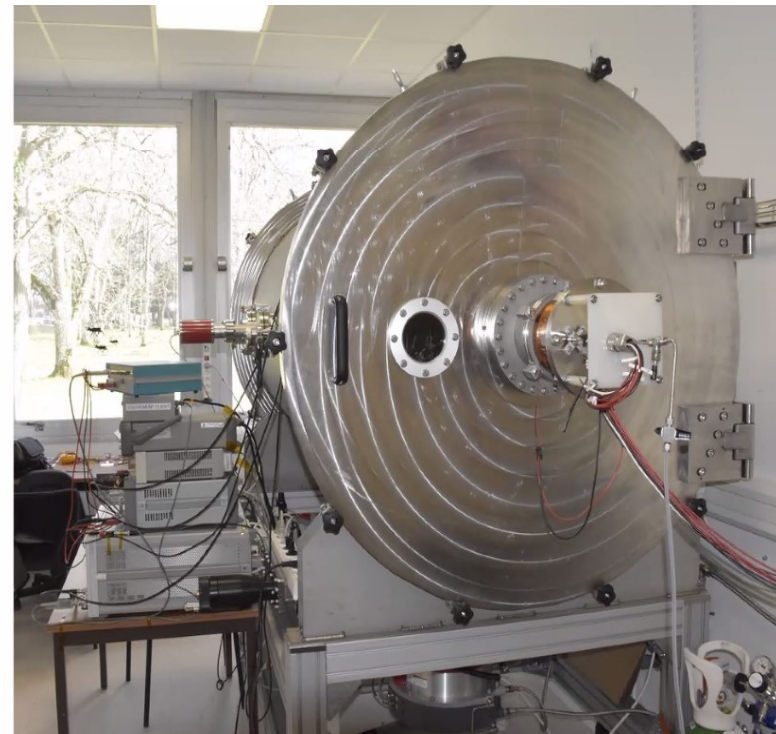


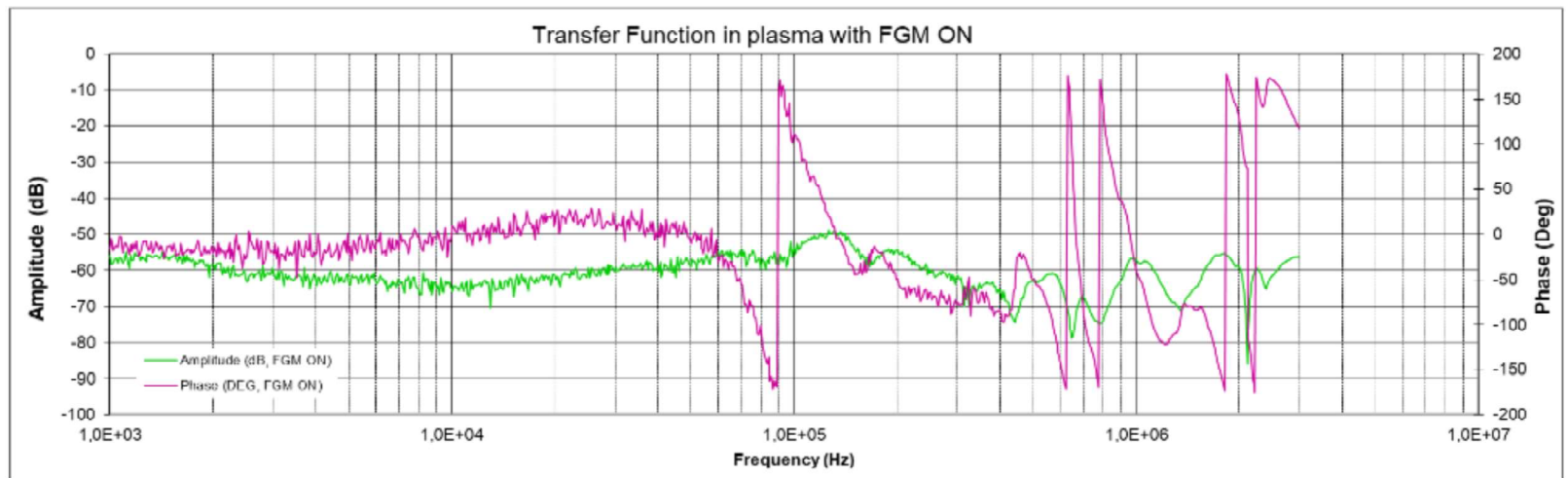
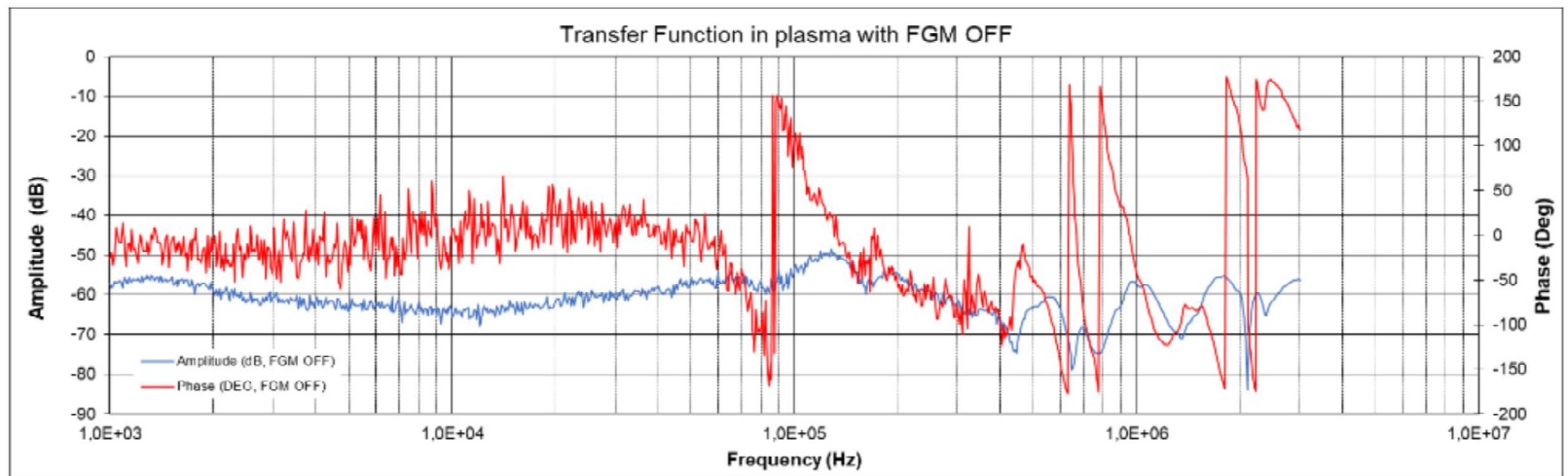
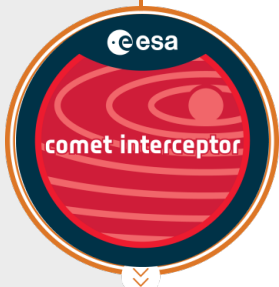


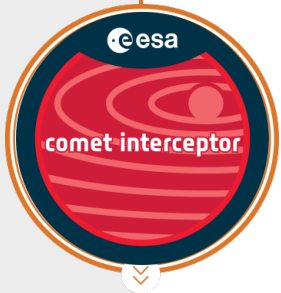


## End-to-end testen

End-to-end testen werden uitgevoerd in een plasma-kamer in Orléans, die bevestigden dat FGM geen negatieve impact heeft op COMPLIMENT HF metingen.





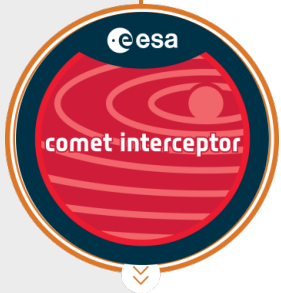


## Stof-impact risico

De probes zullen zeker te lijden hebben onder stof-impact.

- Kleine stofdeeltjes ( $< 1$  micron): die kunnen we meten!  
Is dus eerder interessant.
- Grotere deeltjes ( $< 1$  mm) kunnen voor problemen zorgen.
- Voor echt fatale deeltjes is het risico beperkt.

Schade aan het oppervlak is onvermijdelijk en dus is hercalibreren van de probes na de flyby een noodzaak.



## Status

Deze zomer is er de CDR: Het ontwerp moet vaststaan, wordt in detail beoordeeld.

Na het engineering prototype begint stilaan de bouw van

- EFM : electric & functional model
- STM : structural & thermal model
- (P)FM : flight model
- FS : flight spare







## Besluit

We beleven interessante tijden in het komeetonderzoek!

Kometen begrijpen omvat verschillende disciplines en ook erg diverse instrumenten.

Ruimtemissies duren lang en dus zijn meerdere generaties erbij betrokken.

Stilaan wordt het verband gelegde tussen kometen, het ontstaan van het zonnestelsel, exoplaneten, de samenstelling van interstellaire wolken ... Het is geen op zich staand onderwerp meer.



**BEDANKT!  
MEER INFO?**

[www.aeronomie.be](http://www.aeronomie.be)

[Johan.DeKeyser@aeronomie.be](mailto:Johan.DeKeyser@aeronomie.be)