

Er zit een luchtje aan onze satelliet

Johan De Keyser (Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie)

BIJ HET ONTWERP VAN ruimtetuigen worden strenge en dure voorzorgsmaatregelen genomen om vervuiling tegen te gaan. Toch hoor je af en toe over problemen: optische instrumenten blijken soms mettertijd aan kwaliteit te verliezen omwille van de afzetting van bijvoorbeeld water (in de vorm van ijskristallen) op lenzen. Dat lijkt tegenintuïtief, zeker wanneer men bedenkt dat de ruimte eigenlijk een zeer goed vacuüm is en er dus slechts een heel kleine kans op vervuiling lijkt te zijn. In dit artikel gaan we in op metingen van het Rosetta-ruimtetuig van het Europees Ruimte Agentschap (ESA), die deze problematiek vanuit een onverwachte hoek belichten.

Rosetta werd gelanceerd in 2004. Het doel van deze satelliet is een rendez-vous met komeet 67P/Churyumov-Gerasimenko in 2014. Gedurende het 10 jaar durende traject naar de komeet werden grondige studies van de satelliet en de instrumenten uitgevoerd. We zullen hier enkel kijken naar metingen uitgevoerd door het ROSINA instrument, dat bestaat uit twee massaspectrometers en een druksensor. Het uiteindelijke doel van dit instrument ligt erin de gasvormige omgeving van de komeet te karakteriseren. Testmetingen met het instrument werpen een bijzonder licht op de problematiek van satellietvervuiling. Zoals we zullen zien, is het probleem... dat het instrument te gevoelig is! Er blijkt effectief een 'luchtje' aan de satelliet te zitten.

Rosetta en ROSINA

Rosetta wordt gevoed door zonne-energie op haar missie naar de komeet 67P/Churyumov-Gerasimenko. Het ruimtetuig bestaat uit twee hoofdelementen: de Rosetta orbiter en de Philae lander. De orbiter heeft als af-

metingen 2.8 m x 2.1 m x 2.0 m. Aan weerszijden zijn er 14 m lange zonnepanelen met een totale oppervlakte van 64 m². Deze zonnepanelen zijn enorm, omdat ze voldoende energie moeten leveren op een afstand van 5 astronomische eenheden van de Zon. Dat is min of meer de apheliumafstand en komt overeen met de afstand waarop Rosetta de komeet voor het eerst zal naderen.

De Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis (ROSINA), één van de tien wetenschappelijke instrumenten aan boord, bestaat uit drie sensoren: een druksensor (COPS), een dubbel focuserende massaspectrometer (DFMS) en een time-of-flight massaspectrometer (RTOF). In dit artikel worden enkel metingen door COPS en DFMS voorgesteld. COPS bestaat uit twee verschillende drukmeters voor snelheid en dichtheid, en kan een minuscule druk meten van 10⁻¹¹ mbar. DFMS heeft een onovertroffen gevoeligheid van 10⁻⁵ Å mbar⁻¹. Deze massaspectrometer kan gassen meten met een atoom- of molecuulmassa van 12 tot 150 atomaire massa-eenheden (ame). Zo zal het instrument bijvoorbeeld de hoeveelheid water meten: H₂O is het meest voorkomende gas in een komeetcoma en heeft een molecuulmassa van ongeveer 18 atomaire massa-eenheden. De ROSINA instrumenten hebben een grote gevoeligheid omdat ze gassen moeten kunnen meten die in grote en kleine hoeveelheden voorkomen in de komeetatmosfera: op die manier hoopt men de samenstelling en de chemie van de coma te begrijpen. Het spreekt vanzelf dat Rosetta werd gebouwd onder zeer propere omstandigheden.

Ontgassing van een ruimtetuig

Je kent het verschijnsel wel: Het interieur van een gloednieuwe auto

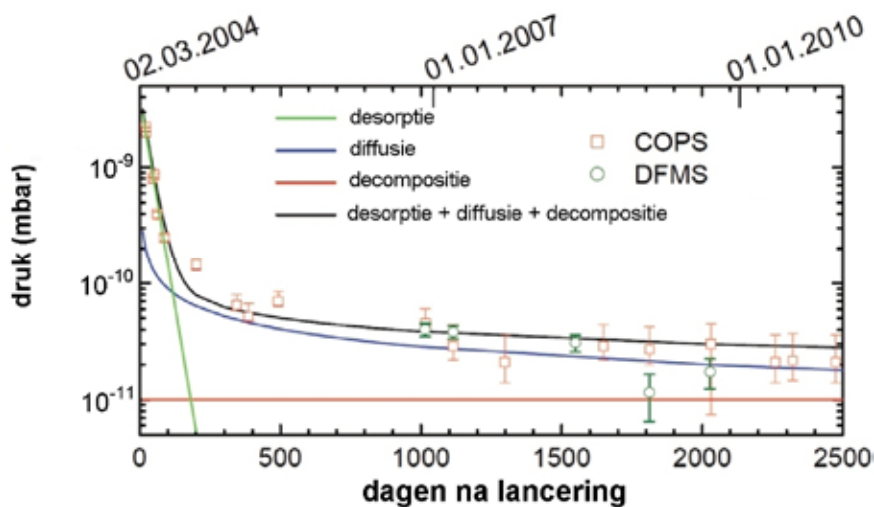
heeft een heel karakteristieke geur. Dat komt omdat de meeste materialen geleidelijk aan bepaalde gassen vrijgeven en dat ruik je. We onderscheiden hier vijf verschillende processen waardoor een ruimtevaartuig gassen produceert.

Aandrijving

Het is evident dat een satelliet gassen uitstoot op het moment dat een raketmotor actief is. Dat gebeurt bijvoorbeeld wanneer stuuraketjes ontbranden om kleine koerscorrecties uit te voeren. Uiteraard weet men wanneer dit gebeurt en welke hoeveelheden gas er de ruimte worden ingestuurd. Soms neemt men beschermende maatregelen tijdens raketontbrandingen: deksels over telescoopopeningen of inlaatopeningen van massaspectrometers worden soms veiligheidshalve eerst gesloten. Je loopt dan natuurlijk een ander risico: wat als de deksels niet terug opgaan?

Sublimatie

Gassen in de omgeving van het ruimtetuig kunnen bevroren op de koudste delen van het satellietoppervlak. Zo wijst bij een interplanetaire missie als Rosetta de communicatieantenne steeds naar de Aarde. Eenmaal de satelliet zich verder van de Zon verwijderd, bevindt de tegenoverliggende zijde van de satelliet zich permanent in de schaduw. De temperatuur kan daar behoorlijk laag zijn, waardoor een ijslaag opgebouwd kan worden. Op momenten dat deze zijde toch het zonlicht ziet en opwarmt, sublimeert dat ijs opnieuw en ontstaat een vrij dichte gaswolk. Dit gebeurde bijvoorbeeld toen Rosetta de asteroïden Steins en Lutetia passeerde: Tijdens die passages oriënteerde men de camera voortdurend op de asteroïden, waardoor de achterzijde van de satelliet gedurende enige tijd opwarmde.



Figuur 1. Gasdruk gemeten door COPS en DFMS aan boord van Rosetta sinds de lancering. De figuur toont de bijdragen van desorptie, diffusie, decompositie, evenals de gecombineerde bijdrage. Figuur: *Rosetta/ROSINA consortium* en *Spectroscopy Now*.

Desorptie

Sommige gassen blijven ‘plakken’ aan het oppervlak van de onderdelen waaruit een satelliet is gebouwd. Dergelijke gassen komen vrij bij opwarming. De druk p van de vrijgekomen gassen volgt de relatie $p = e^{-E_a/RT}$, waar E_a een karakteristieke activeringsenergie voorstelt; R is de gasconstante ($8.314472 \text{ J K}^{-1}\text{mol}^{-1}$) en T de temperatuur. Omdat de temperatuur van Rosetta grosso modo constant blijft met de tijd (de satelliet mag noch te heet, noch te koud worden) zal het oppervlak geleidelijk aan deze geadsorbeerde gassen loslaten: desorptie leidt tot een exponentiële daling van dit soort gassen met de tijd. De activeringsenergie is vrij laag (4 tot 40 kJ mol^{-1}).

Diffusie

Gas dat opgesloten zit binnenin het ruimtetuig of zelfs binnenin bepaalde materialen kan geleidelijk ontsnappen door diffusie. Een voorbeeld hiervan zijn de thermische isolatiedekens die Rosetta bedekken. Het diffusieproces verloopt trager. De ontgassing neemt af met de tijd volgens $t^{-0.5}$ en de activeringsenergie is $20\text{-}60 \text{ kJ mol}^{-1}$.

Decompositie

Een laatste proces is het resultaat van de decompositie van oppervlaktematerialen onder invloed van UV licht

afkomstig van de Zon (dat is energierijk genoeg om bindingen in bepaalde kunststoffen te verbreken) of van materialen binnenin de satelliet onder invloed van energierijke kosmische stralen. Dit proces is doorgaans traag en bijna tijdsafhankelijk omwille van de hoge activeringsenergie.

Een combinatie van al deze processen kan de metingen van COPS en DFMS over meer dan zes jaar sinds de lancering verklaren (figuur 1). COPS werd voor de eerste keer aangezet 20 dagen na de lancering en mat een druk van $2 \cdot 10^{-9}$ mbar. Desorptie domineerde de satellietomgeving. De COPS metingen werden in de eerste 200 dagen na de lancering gekenmerkt door een dalend exponentieel verloop met een $1/e$ vervaltijd van ongeveer 30 dagen. Na die eerste periode werd de druk bepaald door diffusie, gekenmerkt door een vrij langzame afname. Na ruim 1000 dagen was de druk volgens COPS reeds gezakt tot ongeveer $5 \cdot 10^{-11}$ mbar. De DFMS massaspectrometer is veel gevoeliger en mat op dat moment een druk die, binnen de onzekerheidsmarges, gelijk was aan de COPS metingen. Terwijl decompositie verwaarloosbaar is bij het begin van de missie, wordt dit proces relatief belangrijker naarmate de sonde langer in de ruimte is. Men schat dat na 4000 dagen, wanneer

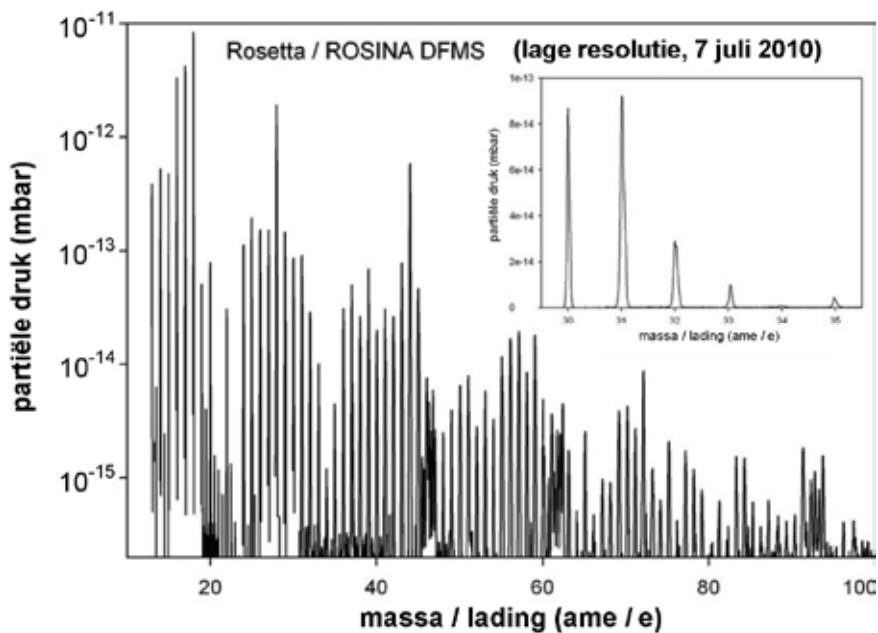
Rosetta het einde van haar missie bereikt, de ontgassing nog steeds gedomineerd zal worden door diffusie. Voor een nog langduriger missie zou decompositie ten langen leste dominant worden. Figuur 1 toont aan hoe de test- en kalibratiemetingen gedurende de lange vlucht van Rosetta een interessant platform bieden voor de studie van ontgassingsmechanismen.

Bronnen van ontgassing op Rosetta

We hebben geconstateerd dat Rosetta langzaam gas verliest. Dat gas zal de metingen nabij de komeet uiteraard verstoren. Om een onderscheid te kunnen maken tussen gas afkomstig van de komeet en dit soort vervuiling eigen aan de satelliet, is het niet alleen belangrijk om te weten dat de hoeveelheid vervuiling behoorlijk laag is, maar we willen ook weten welke vervuilende stoffen er precies aanwezig zijn. Dat is natuurlijk ook nuttig om te weten voor het ontwerp en de materiaalkeuze van toekomstige satellieten en instrumenten.

De DFMS massaspectrometer is een toestel dat heel goed geschikt is om de samenstelling van de vervuilde atmosfeer rondom Rosetta te onderzoeken. Daarom kort iets meer over de werking van het toestel. DFMS wordt in twee modes bediend. De ‘lage resolutie’ mode wordt gebruikt wanneer gevoeligheid of een snelle meetcadans van belang zijn, eerder dan dat massaresolutie prioritair is (massaresolutie is het vermogen om verschillende atoommassa's te onderscheiden). De ‘lage resolutie’ mode zal bijvoorbeeld gebruikt worden kort na aankomst bij de komeet, wanneer de gasproductie verantwoordelijk voor de coma nog op gang moet komen; op dat moment wil men de komeetactiviteit bepalen gewoon door de hoeveelheden van de belangrijkste gassen als H_2O , CO_2 , en CO te bepalen. De ‘hoge resolutie’ mode wordt echter gebruikt wanneer men stoffen met gelijkaardige massa's wil onderscheiden (bijvoorbeeld CO en N_2 , of ^{13}C en CH).

Figuur 2 toont een ‘lage resolutie’ massaspectrum van de omgeving van het ruimtetuig in juli 2010. De meest



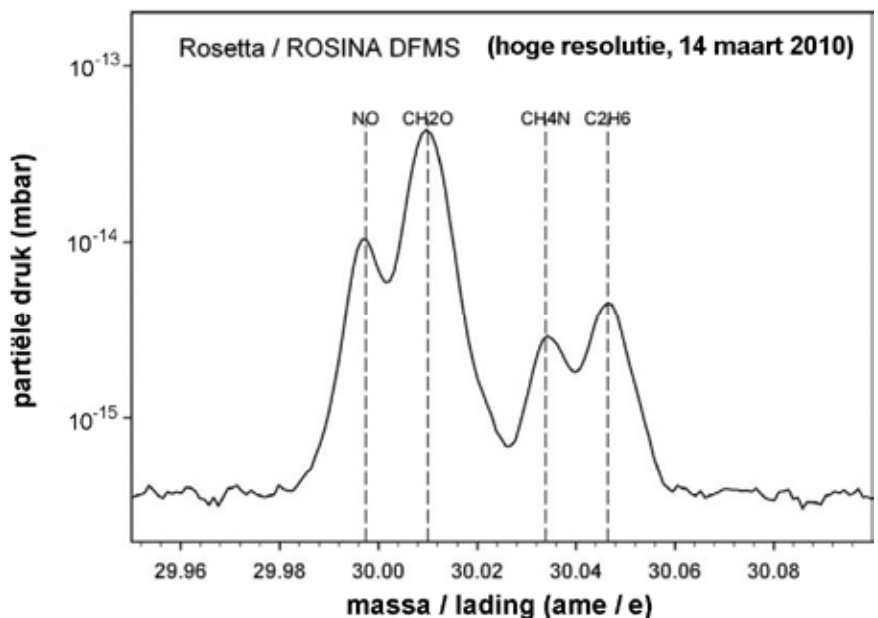
Figuur 2. Een lage-resolutie massaspectrum van het gas rond Rosetta, op een afstand van 2.7 AE van de Zon. Het detail toont hoe goed de verschillende massa's door het instrument onderscheiden worden (ook al is dit slechts een lage-resolutie massaspectrum). Figuur: *Rosetta/ROSINA consortium en Spectroscopy Now*.

prominente signalen zijn H_2O (18 ame/e), OH (17 ame/e) en O (16 ame/e) van de watergroep, het massa 28 signaal (CO en N_2) en de 44 ame/e piek (CO_2). Maar wat opvalt, is vooral de grote variëteit aan andere componenten: bij bijna elke massa wordt iets gedetecteerd! Er zijn slechts een paar massa's waar niets wordt gemeten (23 ame/e en 80 ame/e). Dat is voor een deel het resultaat van de werking van DFMS zelf: binnen het instrument worden neutrale moleculen uit het te meten gas geïoniseerd door elektron impact ionisatie. Die ionisatie is nodig voor de werking van de massaspectrometer, die de ontstane ionen met behulp van elektrische en magnetische velden op massa sorteert. De impact ionisatie kan grotere moleculen in stukken doen breken (fragmentatie) en bijgevolg zullen fragmenten van allerlei grootte worden gedetecteerd. Dat maakt de identificatie van de identiteit van de oorspronkelijke moleculen er niet gemakkelijker op. De algemene verdeling van deze signalen schijnt erop te wijzen dat het hier om organische verbindingen gaat.

Dit vermoeden wordt bevestigd door

te kijken naar DFMS 'hoge resolutie' spectra. Een voorbeeld wordt getoond in figuur 3 voor het gebied rond massa 30. Door dergelijke spectra te bekijken voor alle massa's binnen het meetbereik (12-100 ame/e) kunnen

Figuur 3. Een hoge-resolutie massaspectrum, genomen in maart 2010, toont hoe NO , CH_2O , CH_4N en C_2H_6 onderscheiden kunnen worden door de minieme massa-verschillen van de grootteorde van 0.01 ame. Figuur: *Rosetta/ROSINA consortium en Spectroscopy Now*.



de meeste moleculen en fragmenten geïdentificeerd worden (zie referentie en de referenties daarin).

Water

Men ging er aanvankelijk van uit dat water vooral geadsorbeerd was aan het oppervlak van het ruimtetuig en dat het daarom door desorptie enkele weken na de lancering verdwenen zou zijn. De realiteit blijkt anders. Eerst en vooral moet men bedenken dat vele constructiematerialen die gebruikt worden in een ruimtetuig, een veel groter effectief oppervlak hebben dan men zou denken. Hierbij denken we aan honingraatstructuren die vaak gebruikt worden voor de draagstructuur van een satelliet omwille van hun grote mechanische stijfheid in verhouding tot hun massa. Een ander voorbeeld zijn de thermisch isolerende folies die uit meerdere lagen bestaan, met een effectief oppervlak dat veel groter is dan het oppervlak dat ze bedekken. Bovendien bevinden oppervlakken met geadsorbeerd water zich soms in een grotendeels afgesloten ruimte (bijvoorbeeld binnenin de satelliet) zodat het water dat vrijkomt door desorptie zich middels diffusie een weg naar buiten moet zoeken.

Koolwaterstoffen

Verzadigde lineaire koolwaterstoffen en hun meest voorkomende fragmenten CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} en C_5H_{12} werden gedetecteerd. Daarnaast werden ook een aantal polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAKs) geïdentificeerd, waaronder benzeen (C_6H_6), toluen (C_7H_8), xyleen (C_9H_{10}), en cumeen (C_9H_{12}). Deze koolwaterstoffen zijn waarschijnlijk afkomstig van de ontgassing van oplosmiddelen of van polycarbonaten en polyethyleen-tereftalaten (PETs) die gebruikt worden in de structuur van het ruimtetuig.

Halogenen en smeermiddelen

Zelfs vóór de lancering werd er reeds fluor gedetecteerd op de satelliet, terwijl chloor enkel in de ruimte werd waargenomen. Het is duidelijk dat een deel van het fluor veroorzaakt wordt door restjes van het hard-solderen, maar een deel ervan is zeker ook te wijten aan fluorhoudende koolwaterstoffen.

Na enig detectiewerk blijkt minstens een deel van het fluor, dat voorkomt samen met alifatische verbindingen, afkomstig te zijn van Braycote vacuümvet. Braycote is een geperfluoreerd polyester dat dienst doet als smeermiddel voor de mechanische gewrichten.

Op Rosetta wordt dit smeermiddel gebruikt voor de scharnieren van de antenne, van de zonnepanelen, van deksels die de inlaatopeningen van instrumenten kunnen afdekken. Braycote kan ontbinden als het aan straling wordt blootgesteld. De afbraakproducten zijn vluchtiger dan Braycote zelf en dragen daardoor bij aan de verontreinigde atmosfeer rond het ruimtetuig.

Drijfgas en stikstofverbindingen

Rosetta gebruikt monomethylhydrazine (MMH, CH_3NHNH_2) en stikstoftetroxide (N_2O_4) als brandstof en oxidatiemiddel voor zijn raketmotoren. MMH zelf en een groot aantal van zijn fragmenten kan men terugvinden in het DFMS massaspectrum. De detectie van N_2O_4 daarentegen is nog niet bevestigd. De

verbranding van MMH en N_2O_4 produceert H_2O en CO_2 als uitlaatgassen en draagt daardoor bij aan de achtergrond van deze stoffen. Naast MMH worden ook andere stikstofhoudende moleculen teruggevonden zoals $\text{C}_2\text{H}_4\text{N}$ of $\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2$. Die zijn afkomstig van materialen die polyamines, polyimines, polyurethanen of epoxy bevatten. Deze zijn veelvuldig aanwezig en worden gebruikt in coatings, isolerende vulmiddelen en lijm.

Besluit

Alhoewel men zijn uiterste best doet om 'propre' satellieten te bouwen, is het onvermijdelijk dat er zich een – zij het zeer ijle – gasvormige wolk met verontreinigingen vormt rondom elk ruimtetuig. Met een voldoende gevoelig meetinstrument kan deze gaswolk gedetecteerd worden.

De analyse van massaspectroscopische metingen op Rosetta toont aan dat ontgassing niet onbelangrijk is. Het is alvast interessant om de karakteristieke tijdschalen te bestuderen alsook de samenstelling van de verontreiniging. De mechanismen van desorptie en diffusie zorgen ervoor dat de dichtheid van de wolk afneemt met de tijd. Dat is goed nieuws. Men kan deze ontgassing eventueel versnellen door de satelliet of bepaalde onderdelen ervan op te warmen. Maar zelfs na lange tijd blijft decompositie, en ook trage diffusie vanuit tamelijk afgesloten delen van de satelliet, zorgen voor een blijvende verontreinigende achtergrond.

De huidige generatie massaspectrometers aan boord van wetenschappelijke ruimtetuigen heeft een grote gevoeligheid. De nauwkeurigheid van de metingen wordt niet langer begrensd door die gevoeligheid, maar door de aanwezigheid van verontreinigingen als gevolg van ontgassing. Het is voor Rosetta bijvoorbeeld van groot belang om deze verontreinigingen goed te karakteriseren. Dat moet het mogelijk maken het komeetgas te onderscheiden van de verontreiniging.

De diversiteit aan gassen die ROSINA ontdekt heeft in de omge-

ving van Rosetta, en hun overduidelijke afkomst van bepaalde materialen die gebruikt werden in de constructie, doen vermoeden dat de ontgassingscriteria voor constructiematerialen niet streng genoeg zijn. Tot nu toe wordt een materiaal als geschikt beschouwd indien het totale massaverlies van een staal minder is dan 1% wanneer het verhit wordt tot 125°C gedurende 24 uur, en wanneer het verzamelde vluchtige condenseerbare materiaal dat tijdens hetzelfde proces verloren gaat minder dan 0.1% van de massa van het staal is. Dergelijke materiaaltesten worden uitgevoerd in een vacuümkamer in een aards laboratorium.

In de ruimte moet men echter rekening houden met de aanwezigheid van hoogenergetische fotonen, ionen en elektronen. Die dragen bij tot de decompositie van materiaal. Met andere woorden: de laboratoriumtesten zijn niet helemaal representatief. Maar hoe streng de materiaalkeuze ook is, men kan nooit een zekere graad van ontgassing uitsluiten. Men kan wel proberen de ontgassing te reduceren, bijvoorbeeld door het minimaal houden van de oppervlakte waaraan gas geadsorbeerd kan worden. Het is ook geen goed idee om afgesloten ruimtes te voorzien; integendeel, oordeelkundig geplaatste openingen laten geadsorbeerd gas snel ontsnappen.

Ten slotte is er nog een bijkomende complicatie: indien de ontgassing van de satelliet niet identiek is in alle richtingen, produceert het ontsnappende gas een netto kracht op het ruimtetuig, en dus een effectieve versnelling. Dit werd bijvoorbeeld geconstateerd tijdens een Rosetta manoeuvre in januari 2011.

Referentie

Dit artikel is een vertaling en vrije bewerking van de publicatie: M. Hässig, K. Altwegg, H. Balsiger, B. Schläppi, J.J. Berthelier, B. Fiethe, S.A. Fuselier, J. De Keyser en M. Rubin, *Investigation of spacecraft outgassing by sensitive mass spectrometry*, Spectroscopy Europe, 23, 20-23, 2011.