



Een blik onder het ijs

Hoe kun je de oceanen onder het bevroren oppervlak van de Saturnusmaan Enceladus en de Jupitermaan Europa bestuderen? En hoe bepaal je of daar moleculen in te vinden zijn die op leven zouden kunnen wijzen? Op die vragen richten twee onlangs gefinancierde projecten zich, geleid door TU Delft-wetenschappers Stéphanie Cazaux en Niels Ligterink.

Zijn we alleen in het universum? Dit is waarschijnlijk een van de meest fundamentele wetenschappelijke vragen, die decennia aan verkenning door het zonnestelsel heeft aangestuurd. Verrassend genoeg bevinden sommige van de meest veelbelovende omgevingen voor de zoektocht naar leven zich niet op warme werelden die op de aarde lijken, maar op koude, verre ijsmanen die om Jupiter en Saturnus cirkelen. Onder hun bevroren oppervlakken bevinden zich oceanen, verborgen onder tientallen kilometers ijs, die mogelijk de ingrediënten voor leven herbergen.

Dankzij observaties van ruimtevaartuigen als Cassini en de James Webb Space Telescope (JWST) zijn Enceladus, een maan van Saturnus, en Europa, een maan die rond Jupiter cirkelt, onze voornaamste doelen geworden. Met aankomende missies, zoals JUICE (ESA), Europa Clipper (NASA) en ESA's toekomstige L4-missie, ontwikkelen wetenschappers nieuwe manieren om deze oceanen waar te nemen en moleculen op te sporen die op biologische activiteit kunnen wijzen. Aan de TU Delft zijn twee projecten gestart om te onderzoeken hoe oceanen het oppervlak bereiken en hoe biologisch relevante moleculen kunnen worden gedetecteerd: LeakingOceans en LMC_{ool}.

Waterdamp en ijskorrels

Het LeakingOceans-project onderzoekt hoe oceaanmateriaal door de ijschillen van ijsmanen migreert voordat het waarneembaar is op het oppervlak

of in de stoom gedurende erupties van geisers. Hoewel deze oceanen zelf vooralsnog onbereikbaar blijven, biedt het oppervlak van de manen een natuurlijk venster op hun samenstelling en dynamica. Eerdere missies hebben aangetoond dat begraven oceanen via verschillende processen naar het oppervlak lekken. Deze processen staan centraal in LeakingOceans.

In 2005 zorgde het ruimtevaartuig Cassini voor een revolutie in ons begrip van Enceladus door geisers te ontdekken die bij de zuidpool naar buiten spuiten. Deze geisers bestaan uit waterdamp en kleine ijskorrels die rechtstreeks uit de ondergrondse oceaan ontsnappen via scheuren in de ijskorst. De analyses van deze korrels toonden aan dat ze zouten en complexe organische moleculen bevatten. Bovendien bleken de ijskorrels een kristallijne structuur te hebben. Die eigenschap suggereert dat ze in warm oceaanwater zijn gevormd en daarna bevroren zijn. Al deze waarnemingen samen lijken erop te wijzen dat de ondergrondse oceaan van Enceladus de sleutelingredienten bevat voor leven zoals wij het kennen.

Waarnemingen van de Hubble Space Telescope suggereren dat er ook op de maan Europa kleinschalige geisers te vinden zijn, die af en toe uitbarsten. Hoewel deze geisers niet met zekerheid zijn gedetecteerd, zijn er wel breuken in de ijskorst waargenomen waardoor de ondergrondse oceaan het oppervlak kan bereiken. Beide opties bieden geweldige mogelijkheden om deze verborgen oceaan waar te nemen.

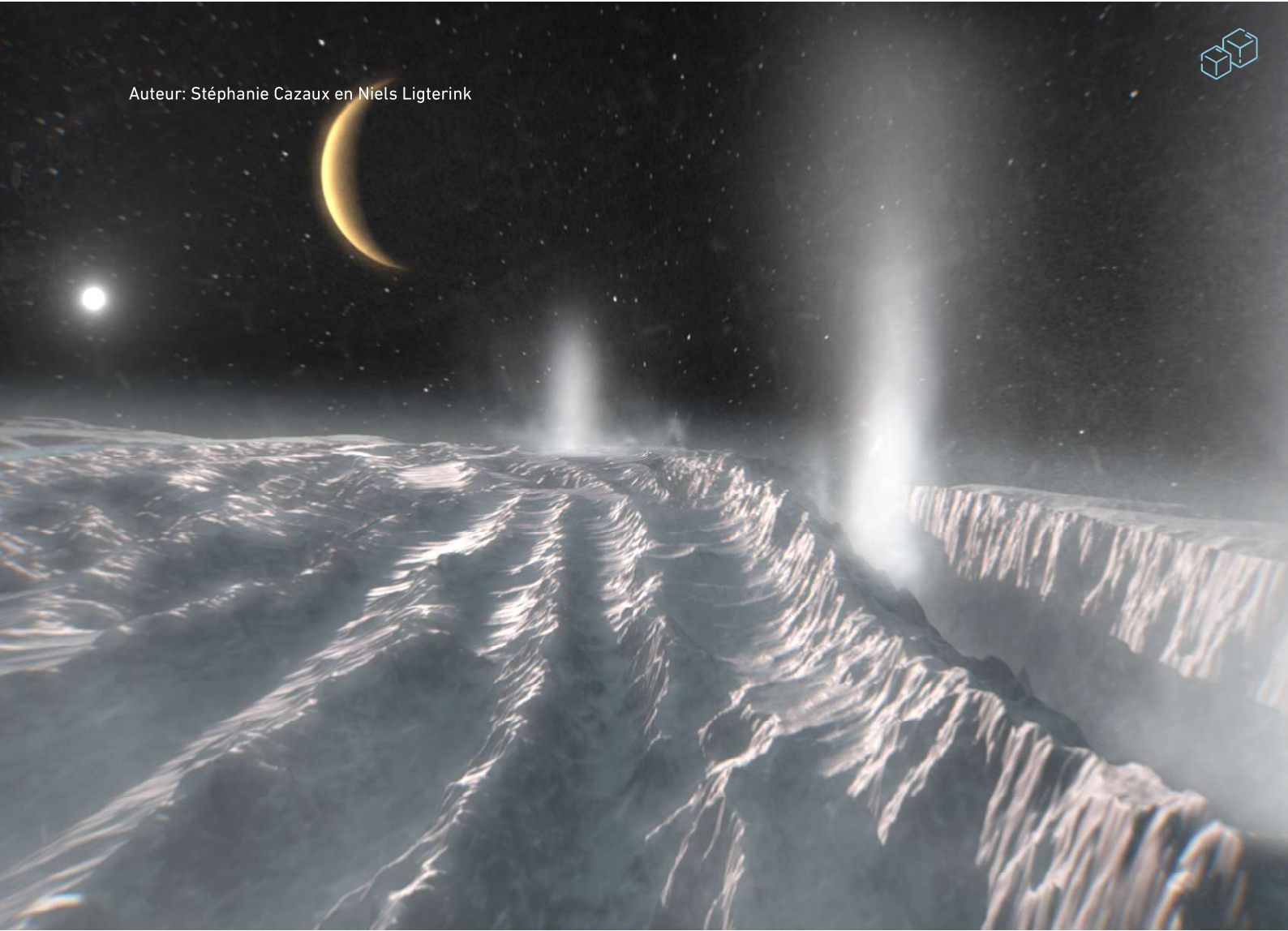
Van lab naar planeet

Oppervlaktewaarnemingen van ijsmanen door JWST hebben ongekende details in de infraroodspectra van de Jupitermanen Ganymedes en Europa opgeleverd, samen met aanvullende aanwijzingen over interacties tussen oceaan en oppervlak. Op deze manen zijn vluchtige moleculen gedetecteerd zoals CO₂, een molecuul dat instabiel is onder de straling en temperatuuromstandigheden op de oppervlakken van deze manen. Dit duidt op continue aanvulling van diep in het ijs, mogelijk uit de oceaan.

Laboratoriumexperimenten hebben onderzocht hoe moleculen zich door micrometers dik ijs bewegen, maar hoe je deze resultaten naar kilometers dikke ijslagen kunt extrapoleren, is nog grotendeels onduidelijk. Het begrijpen van deze processen is cruciaal voor de interpretatie van de spectrale kenmerken die we aan de oppervlakken van ijsmanen zien en voor het identificeren van de wegen waarlangs ondergrondse oceanen materiaal naar de buitenomgeving brengen. Deze uitdaging vormt de basis van het LeakingOceans-project, een vijfjarig initiatief dat door de Europese Commissie wordt gefinancierd met een ERC Advanced Grant. Het project beoogt verbanden te leggen tussen processen die op microscopische schaal van ijsvorming plaatsvinden en waarneembare kenmerken op planetaire schaal. Onder laboratoriumomstandigheden willen we gaan nabootsen hoe oceaanmateriaal wordt opgenomen in oppervlakte-ijs. Een reeks modellen zal de waarnemingen op laboratoriumschaal aan planetaire schalen koppelen.



Auteur: Stéphanie Cazaux en Niels Ligterink



In 2005 ontdekte het ruimtevaartuig Cassini geisers op Saturnusmaan Enceladus, die bij de zuidpool naar buiten spuiten (illustratie: ESA/Science Office).

Ongeëvenaard inzicht

Een belangrijke uitdaging is om beter te begrijpen hoe ijs vormt en evolueert onder de omstandigheden van ijsmanen, en hoe de spectrale ‘vingerafdrukken’ ervan zich verhouden tot de vorming en geschiedenis. Door systematisch de complexiteit van ijsmonsters te vergroten, zal het project de fysische en chemische omstandigheden identificeren die deze spectrale handtekeningen bepalen. Deze gecontroleerde experimenten worden aangevuld door quantummechanische rekenkundige modellen, die helpen bij het interpreteren van de kenmerken van de waargenomen handtekeningen. Via deze gecombineerde experimentele en theoretische benadering willen we vaststellen hoe geisers en diffusieprocessen ondergrondse materialen naar het oppervlak transporteren, wat de efficiëntie van deze

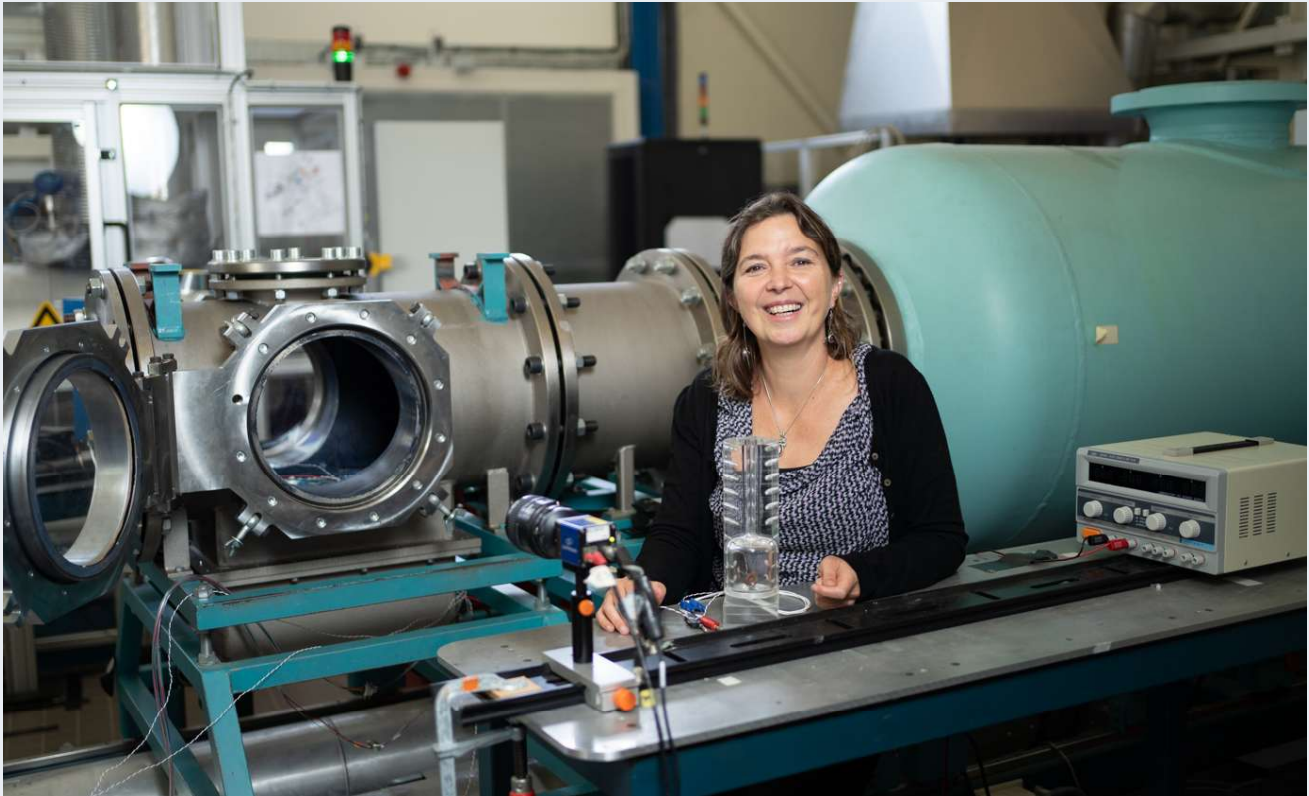
mechanismen is en welke spectrale vingerafdrukken ze achterlaten. Deze resultaten vergelijken we vervolgens met waarnemingsgegevens van JWST, waardoor het mogelijk wordt om uit oceanen afkomstig materiaal te identificeren en de verdeling ervan over verschillende soorten gebieden op Europa, Ganymedes en andere ijsmanen te kwantificeren. Door laboratoriumexperimenten, rekenkundige modellering en gegevens van telescopen met hoge resolutie met elkaar te combineren, zal LeakingOceans een ongeëvenaard inzicht verschaffen in de dynamica die oceanen en oppervlakken op deze verre werelden verbindt.

Abiotisch of biologisch?

Terwijl LeakingOceans zich richt op het begrijpen hoe ondergrondse oceaanmaterialen het oppervlak van Enceladus bereiken, blijft er nog een

verdere uitdaging: zodra deze materialen toegankelijk zijn voor ruimtemissies, hoe kunnen we dan moleculen identificeren die het bestaan van leven suggereren? Dit is precies waarvoor LMC_{ool} – de (Origin of) Life Marker Chip – wordt ontwikkeld.

Leven zoals wij dat kennen, berust op drie fundamentele klassen van moleculen: eiwitten (opgebouwd uit aminozuren), genetisch materiaal zoals DNA (opgebouwd uit nucleobasen) en celmembranen (samengesteld uit vetzuren). Als we deze moleculen op Enceladus in de juiste verhoudingen en concentraties aantreffen, zou dit op biologische activiteit kunnen wijzen. Maar sommige van deze bouwstenen kunnen ook ontstaan via puur chemische processen zonder verband met biologie: abiotische synthese. Het vinden van geïsoleerde sporen van aminozuren of nucleobasen bewijst



Stéphanie Cazaux leidt het LeakingOceans-project, dat onderzoekt hoe materiaal uit ondergrondse oceanen van ijsmanen als Europa en Enceladus het oppervlak bereikt (foto: TU Delft).

dit weinig. De sleutel tot het identificeren van leven is het detecteren van deze moleculen in patronen en concentraties die zo ver afwijken van wat abiotische chemie kan voortbrengen dat alleen biologische processen ze zouden kunnen verklaren.

Ander uitgangspunt

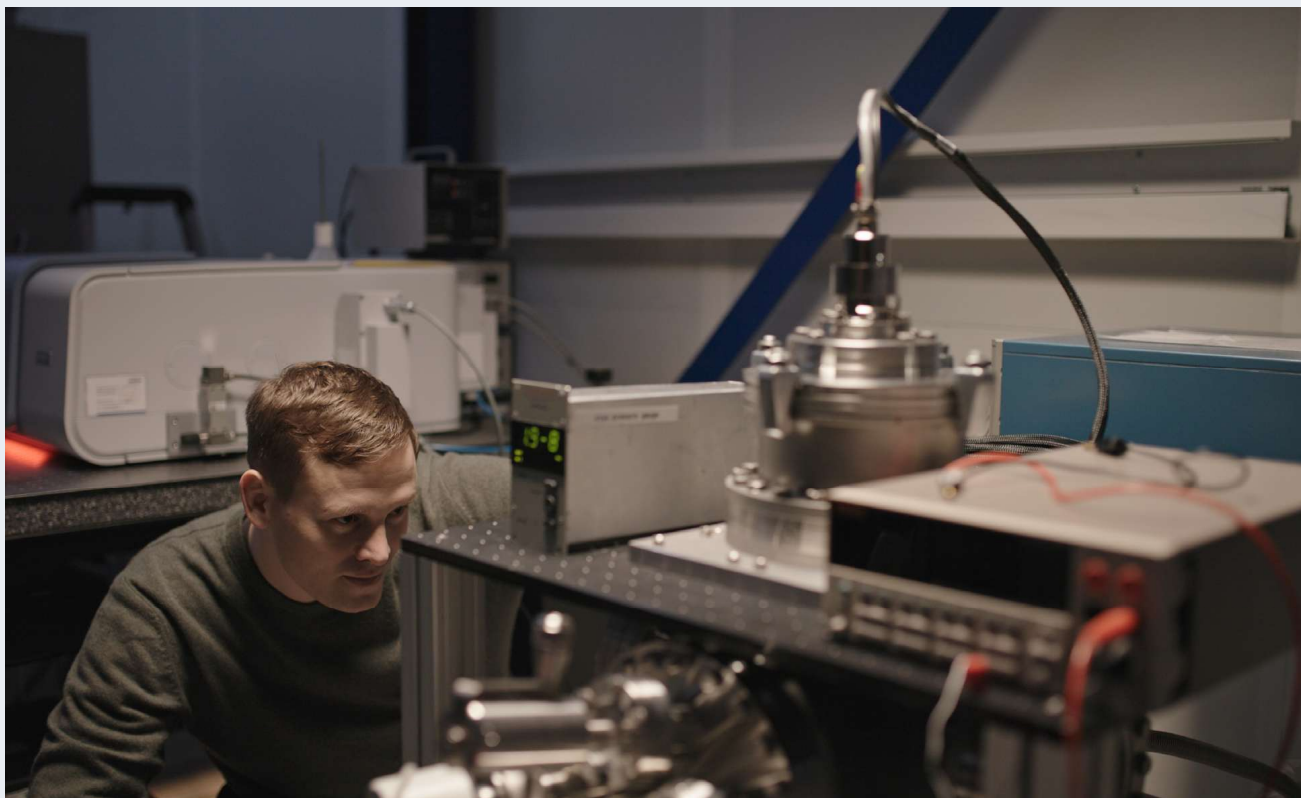
Traditionele ruimtevaartuiginstrumenten ontworpen voor moleculaire detectie, zoals de massaspectrometers aan boord van de Viking-landingsmodules, de Curiosity-rover en de ExoMars-rover, bereiken een indrukwekkende gevoeligheid, maar kampen met fundamentele beperkingen. Om metingen mogelijk te maken, worden monsters verhit in een proces dat pyrolyse heet. Dat kan minder stabiele organische moleculen vernietigen voordat ze kunnen worden geanalyseerd. Bovendien zijn hun complexe massaspectra moeilijk met zekerheid te interpreteren. Deze instrumenten hebben historisch gezien moeite gehad om een definitieve identificatie van complexe biomoleculen te geven.

LMC_{ool} hanteert een fundamenteel ander uitgangspunt, dat gebaseerd is op geïntegreerde fotonische circuits, waarbij licht in geminiaturiseerde optische schakelingen wordt geleid en gemanipuleerd. Sensoreenheden van minder dan 0,1 vierkante millimeter groot vormen het hart van LMC_{ool} en benutten lichtinterferentie om moleculen met uitzonderlijke precisie te detecteren. Wanneer moleculen in een vloeistof het sensoroppervlak van de chip bereiken, binden zij zich aan receptormoleculen: gespecialiseerde chemische structuren die speciaal zijn ontworpen om specifieke moleculen te binden, net zoals een sleutel in een slot past. Naarmate deze moleculen zich op het sensoroppervlak ophopen, veranderen ze de brekingsindex. De sensor meet deze verandering in de vorm van een interferentiepatroon, dat de aanwezigheid van een molecuul onthult. Doordat de receptoren heel selectief zijn in welke moleculen ze binden, kan LMC_{ool} specifieke biomoleculen met grote zekerheid identificeren.

Doordat LMC_{ool} in de vloeibare fase werkt, blijven onstabiele biomoleculen intact, wat verschilt van oudere detectiemethoden waarbij deze moleculen konden fragmenteren. Het geïntegreerde ontwerp heeft ook praktische voordelen: alle onderdelen worden gefabriceerd op een enkel miniatuursysteem met een beperkt aantal bewegende onderdelen. Deze integratie bespaart massa en energieverbruik, en verkleint het risico op mechanische storingen tijdens missies die diep het zonnestelsel in gaan.

Complexe mengsels

De inzet van LMC_{ool} op een missie naar Enceladus brengt enorme technische uitdagingen met zich mee. De extreme ruimteomgeving legt meerdere beperkingen op, terwijl de gehele lading uiterst licht, klein en energiezuinig moet blijven. Twee specifieke technische uitdagingen illustreren de complexiteit. Ten eerste kunnen de receptormoleculen door straling beschadigd worden.



Niels Ligterink werkt in het lab aan de chip LMC_{00L}, waarmee moleculen geïdentificeerd kunnen worden in materiaal afkomstig uit de oceanen onder het oppervlak van ijsmanen (foto: Marije Gordijn).

Deeltjes die met hoge energie door de ruimte reizen, kunnen chemische bindingen in deze receptoren breken en zo het vermogen van het instrument om moleculen te detecteren geleidelijk vernietigen. Om dit te voorkomen, worden er voor LMC_{00L} nieuwe receptoren gesynthetiseerd en getest die beter tegen straling kunnen.

Ten tweede zullen monsters die verzameld worden op Enceladus complexe mengsels zijn, die naast water verschillende organische moleculen, minuscule mineraalkorreltjes en opgeloste zouten bevatten. Al deze componenten kunnen metingen verstoren, hetzij door receptoren te blokkeren, hetzij door foutieve signalen te creëren. Binnen het LMC_{00L}-project is het dus van belang om te begrijpen hoe ernstig deze verstoringen zijn, en of er bijvoorbeeld chemische filtering voor analyse nodig is. Het is nog niet zeker of LMC_{00L} meegaat met ESA's L4-missie, maar het is wel precies het soort

instrument dat deze missie nodig zal hebben. De L4 is een zogenaamde LargeClass-missie, het duurste en vaak technologisch meest gecompliceerde missietype dat ESA uitvoert. L4 is momenteel in ontwikkeling en heeft Enceladus als bestemming. Met een verwachte lanceerdatum van 2042 en daarna nog zo'n tien jaar reistijd is het een missie van de lange adem om de studie van deze maan mogelijk te maken.

Dynamische werelden

Het aankomende decennium belooft grote vooruitgang in het onderzoek naar ijsmanen. Missies zoals JUICE, Europa Clipper en JWST zullen ongekende toegang geven tot oppervlakken en geisers van ijsmanen. Door deze gegevens te interpreteren en te combineren met laboratoriumresultaten, en met behulp van geavanceerde detectietechnologieën, kunnen wetenschappers chemische vingerafdrukken van oceaanmateriaal

opsporen en wellicht het eerste concrete bewijs van leven buiten onze planeet vinden.

Ijsmanen, ooit beschouwd als bevroren en levenloos, worden nu gezien als dynamische werelden waar oceanen, ijs en oppervlakteprocessen op complexe manieren samenwerken. Projecten als LeakingOceans en LMC_{00L} bieden methoden en gereedschappen om deze mysteries te ontrafelen, waardoor de mensheid dichterbij komt bij het beantwoorden van de oude vraag of we alleen zijn in het universum.

Stéphanie Cazaux is universitair hoofd-docent planetaire exploratie, luchtvaart- en ruimtevaarttechniek aan de TU Delft. Deze zomer ontving ze een ERC Advanced Grant voor haar LeakingOceans-project.

Niels Ligterink is universitair docent planetaire exploratie, luchtvaart- en ruimtevaarttechniek aan de TU Delft. Hij leidt het consortium dat de chip LMC_{00L} ontwikkelt.