

Jack Challoner

WATER

Fascinerend van damp tot ijs

in samenwerking met
NewScientist

INHOUD

Inleiding **6**

Hoofdstuk 1 'Water, water, overal' **10**

Hoofdstuk 2 Blauwe planeet **42**

Hoofdstuk 3 H₂O **76**

Hoofdstuk 4 In drie fasen **100**

Hoofdstuk 5 Aan de waterkant **128**

Hoofdstuk 6 'Het middelpunt van het leven' **156**

Noten **174**

Bronvermelding illustraties **182**

Trefwoordenregister **184**

INLEIDING

In haar boek uit 1995, *Sea Change: A Message of the Oceans*, schreef de Amerikaanse oceanograaf Sylvia Earle: 'Er is volop water in het heelal zonder leven, maar nergens is er leven zonder water.' Ze heeft in beide gevallen gelijk. Hoofdstuk 1 van dit boek onderzoekt de oorsprong van het water in het heelal, en waar het in de ruimte kan worden aangetroffen. Hoofdstuk 2 beschouwt de vraag hoe water op aarde belandde en volgt het water op zijn onophoudelijke reis in de waterkringloop op onze planeet – inclusief de cruciale rol die water speelde bij de oorsprong van de menselijke beschaving.

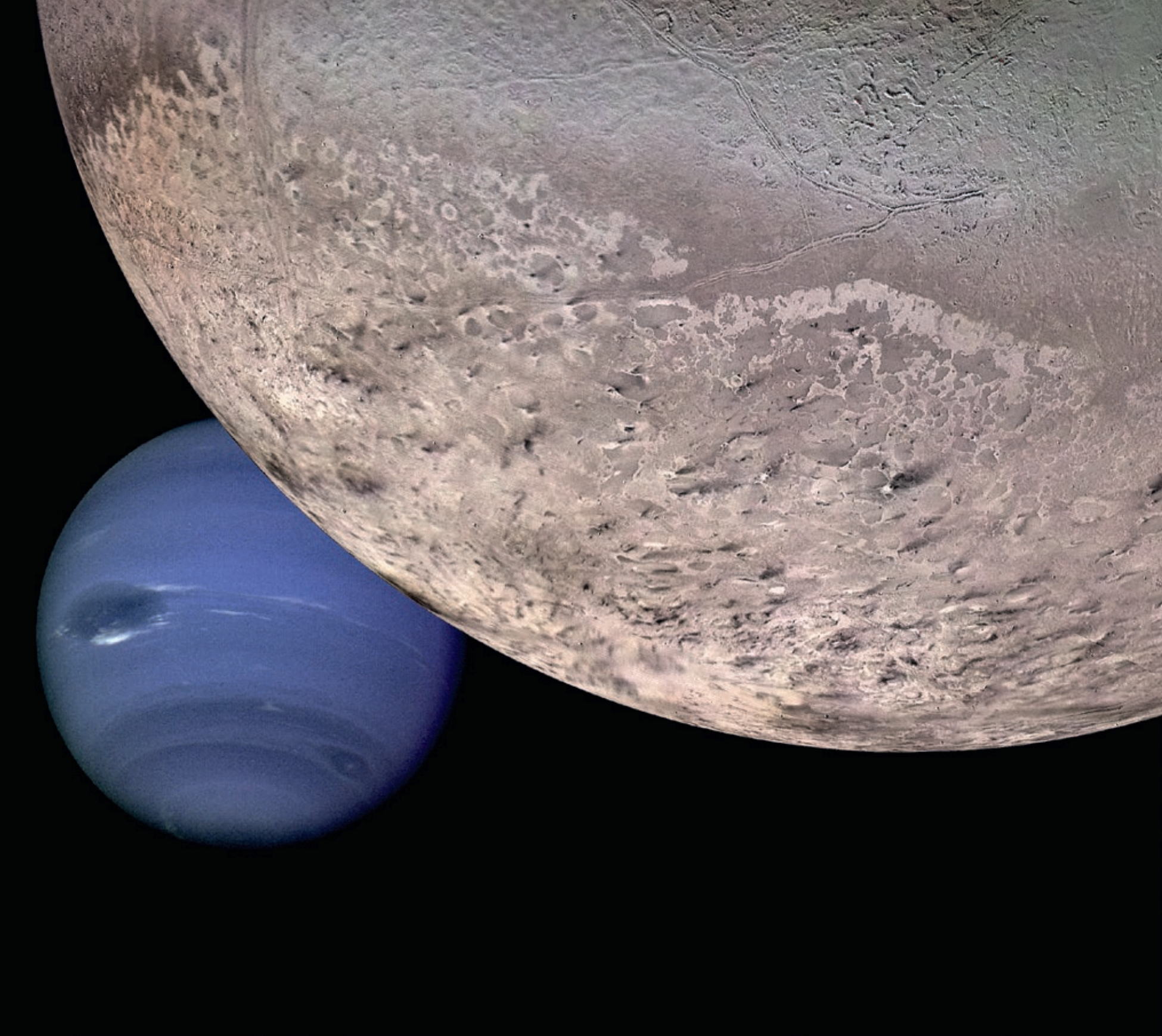
Water is zo vertrouwd en belangrijk dat het voor ons gemakkelijk is om het als doodnormaal te beschouwen. De gemiddelde Amerikaan gebruikt 340 liter water per dag – vooral voor wassen, koken en wegspoelen van afval. Nederlanders en Belgen gebruiken aanzienlijk minder, nog geen 120 liter per persoon per dag. Bijna elke vloeistof die we in ons dagelijks leven tegenkomen, bevat water, op zichzelf of met andere stoffen daarin opgelost of gedispergeerd. Melk bijvoorbeeld bestaat voor 87 procent uit water, en vetten, eiwitten en suikers vormen de rest daarvan. Water is 'ingebouwd' in elk product dat we kopen – 15.500 liter water is er nodig voor een kilo rundvlees en 40.000 tot 80.000 liter water voor de fabricage van een auto. Water vervult een centrale rol in ons klimaat: wolken verspreiden warmte rondom de wereld, oceanen vormen een belangrijke zinkput voor koolstofdioxide en enorme volumes aan ijs aan de polen dempen schommelingen in de temperatuur.

Hoofdstuk 3 volgt de geschiedenis van hoe grote denkers ontdekten waar water uit bestaat en onthult de wisselwerkingen tussen watermoleculen. Die wisselwerkingen liggen aan de basis van het bestaan en gedrag van water in vaste, vloeibare en dampvorm – die verder in detail worden verkend in hoofdstuk 4.



Water is zo belangrijk en zo vertrouwd dat het redelijk lijkt om aan te nemen dat het een 'gewone' vloeistof is. Maar in feite bestaat er zoals water geen enkele andere vloeistof – het heeft een unieke verzameling eigenschappen. Water is zo'n eenvoudig en klein molecuul en zo uitgebreid bestudeerd, dat het volstrekt redelijk lijkt om aan te nemen dat we het volledig begrijpen. En toch blijft nog veel van deze unieke verbinding ondoorgrond. De eigenschappen van water hebben hun grootste invloed op grensvlakken, tussen water en andere materialen – zoals verkend in hoofdstuk 5. En, zoals Sylvia Earle schreef, 'nergens is er leven zonder water'. Hoofdstuk 6 verkent hoe de wisselwerkingen van water met andere verbindingen leven mogelijk maken – hier op aarde, en wellicht ook elders.

De kleinste druppeltjes oceaannevel hebben een doorsnede van ongeveer een tienduizendste meter. Watermoleculen zijn zo klein dat er in een druppeltje van die omvang meer dan een biljoen voorkomen.



Hoofdstuk 1

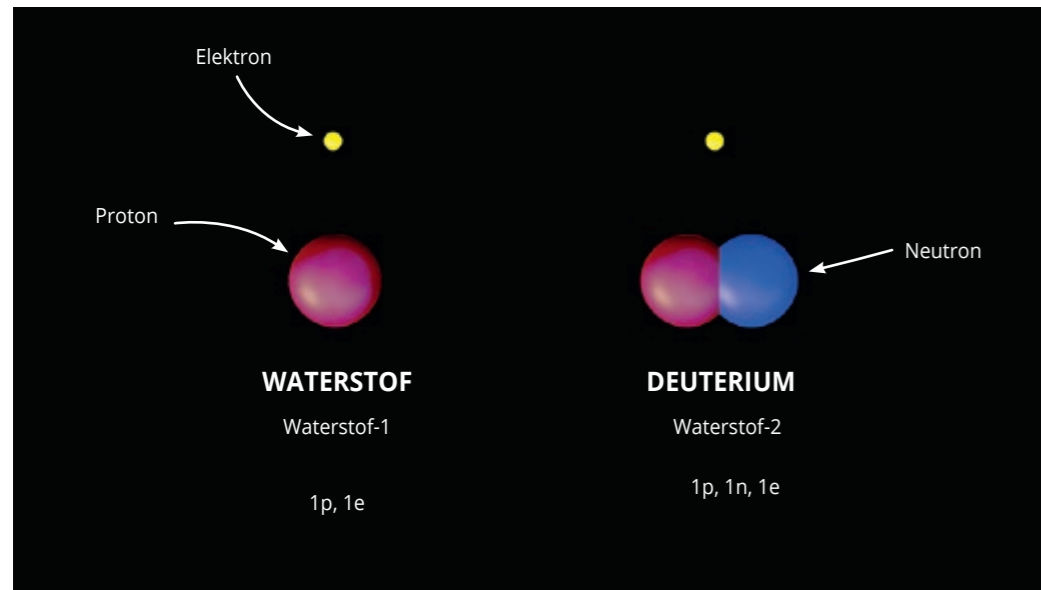
'WATER, WATER, OVERAL'

De titel van dit hoofdstuk verwijst naar het beroemde gedicht van Samuel Taylor Coleridge, 'De Ballade van de Oude Zeeman' (*The Rime of the Ancient Mariner*). In dat gedicht vertelt de zeeman uit de titel hoe winden zijn schip vanuit de woeste, ijzige wateren van de Zuidelijke IJszee meevoerden naar de warmere wateren nabij de evenaar. Daar raakte het schip in katzwijn, nauwelijks bewegend in de vrijwel niet-bestaande wind. De zeeman denkt eraan terug dat terwijl het schip zo ronddobberde, er rondom water was, maar 'geen druppel om te drinken' - en Coleridge benadrukt onze basisbehoefte aan water in veel van de dichtverzen. In zekere zin bevinden wij ons ook drijvend op een uitgestrekte oceaan van water, want H₂O is een van de meest voorkomende verbindingen in het heelal. En net zoals de oceaan waarop het schip van de oude zeeman dobberde, vormt het grootste deel van de kosmische oceaan niet de vertrouwde heldere vloeistof waar onze levens zo van afhangen. Welk soort water bevindt zich dan daarbuiten in de ruimte? En wanneer en hoe is het ontstaan?

In den beginne

Het is wellicht geen verrassing dat water zo algemeen in de kosmos voorkomt: het bestaat uit waterstof – veruit het meest voorkomende element – en zuurstof, het op twee na meest voorkomende element. Waterstof is gevormd tijdens de eerste minuten van het heelal, ongeveer 13,8 miljard jaar geleden. Het waren echter waterstofkernen, en geen waterstofatomen, die in die vroegste periode ontstonden. Dat komt omdat het heelal zo heet was dat elektronen te veel energie hadden om zich aan de kernen te kunnen hechten – en die hechting is een noodzakelijke voorwaarde voor atomen. De meeste waterstofkernen zijn eenvoudige naakte protonen; bij een klein deel is daaraan een neutron verbonden, een kern van waterstof-2 ofwel deuterium vormend – dat, zoals we zullen zien, zeer belangrijk is in de geschiedenis van water in ons zonnestelsel. Tijdens die eerste paar minuten verbonden sommige van de waterstof- en deuteriumkernen die waren gevormd zich tot heliumkernen (en een nog veel kleiner aantal tot lithiumkernen). Ongeveer 300.000 jaar na de oerknal was het heelal voldoende afgekoeld opdat elektronen zich aan kernen konden hechten: de eerste atomen, van waterstof (inclusief enig deuterium), helium en lithium, konden eindelijk ontstaan.

Tot op de dag van vandaag vormen waterstof en helium meer dan 99 procent van de materie in het heelal (donkere materie niet meetellend, die overtreft normale materie met een factor groter dan acht – maar dat is een ander, nog nauwelijks begrepen verhaal). De waterstof-, deuterium- en heliumkernen vormden de beginpunten voor de vorming van



Kernen van waterstof en deuterium, met elk een elektron. Het proton (paars) draagt een positieve lading, terwijl het elektron (geel) een even grote hoeveelheid aan negatieve lading draagt en het neutron (blauw) neutraal is – een atoom is als geheel daardoor neutraal. Gedurende de eerste 300.000 jaar was het jonge heelal te heet voor de koppeling van elektronen aan atoomkernen.



De Paardenkopnevel, ongeveer 1600 lichtjaar van ons vandaan. De kenmerkende rode kleur is afkomstig van waterstofgas dat door de ultraviolette straling van jonge sterren energie verkrijgt. De verlichte wolk wordt deels verhuld door een donkere wolk waarin geen sterren worden gevormd.

de andere elementen, waaronder zuurstof, bij energierijke kernreacties – veelal binnen in sterren en tijdens hun gewelddadige doodstrijd, de supernova's. De eerste sterren ontvlamden ongeveer 200 miljoen jaar na de oerknal, toen enorme wolken van waterstofgas en heliumgas ineenstortten tot samenklontering, voldoende hoge drukken en temperaturen opleverend waardoor elementen vormende kernreacties daarbinnen konden beginnen. De eerste zuurstofkernen zouden snel na de geboorte van de eerste sterren zijn gevormd.

Er konden geen watermoleculen ontstaan voordat zuurstof gevormd in de kernen van die eerste sterren was vrijgekomen. Supernova's verspreidden de inhoud van die stervende sterren over uitgestrekte volumes aan ruimte met onvoorstelbaar krachtige explosies, waarbij reusachtige gaswolken werden gevormd. In 2017 gebruikte een groep sterrenkundigen de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array in Chili en spoorde de kenmerkende 'vingerafdruk' van zuurstofmoleculen op in straling afkomstig uit interstellaire gaswolken binnen een extreem ver gelegen sterrenstelsel.¹ Dat sterrenstelsel is zo ver weg dat de straling die de groep ontdekte, meer dan 13 miljard jaar door de ruimte had gereisd.

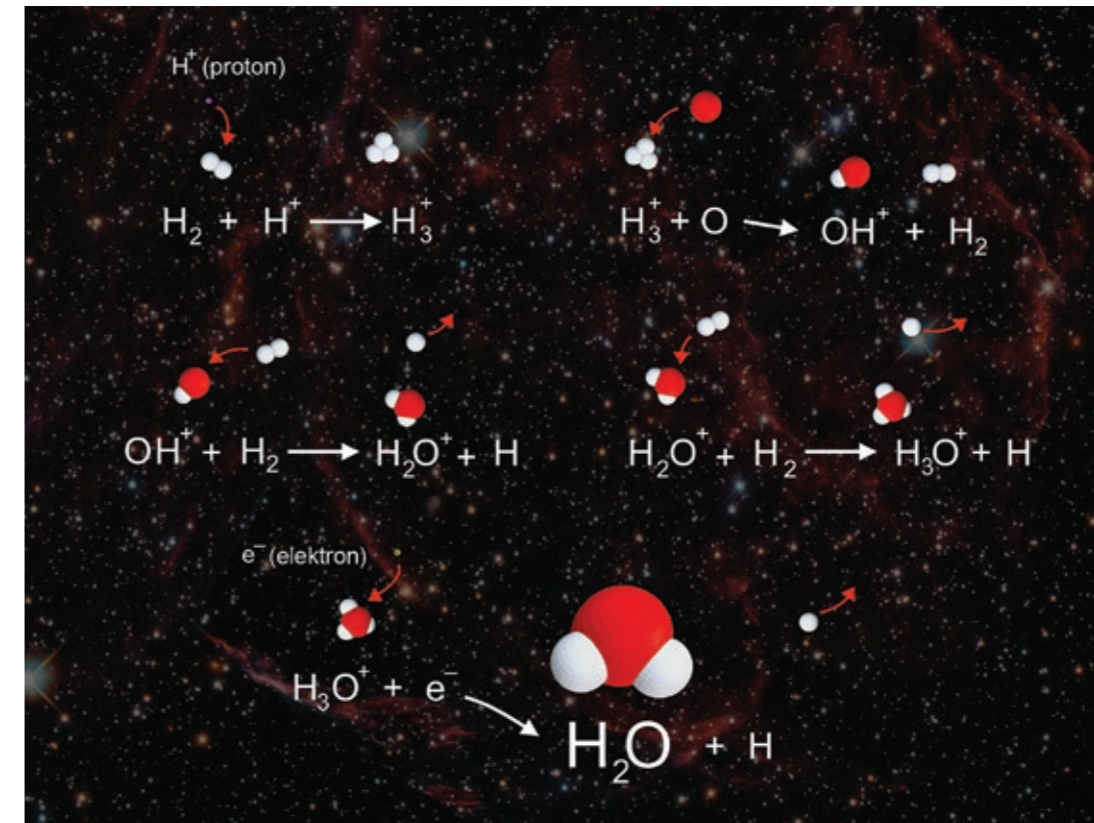
Artistieke weergave van een ring van materiaal die een reusachtig zwart gat in het midden van het sterrenstelsel APM 08279+5255 voedt. Daar vonden wetenschappers de vroegst bekende en grootste hoeveelheid water in het heelal.



De sterrenkundigen schatten dat de zuurstof aan de ruimte moet zijn afgegeven rond 600 miljoen jaar na de oerknal. Toen er zowel waterstof- als zuurstofatomen voorkwamen, was water eindelijk een mogelijkheid geworden.

Water maken

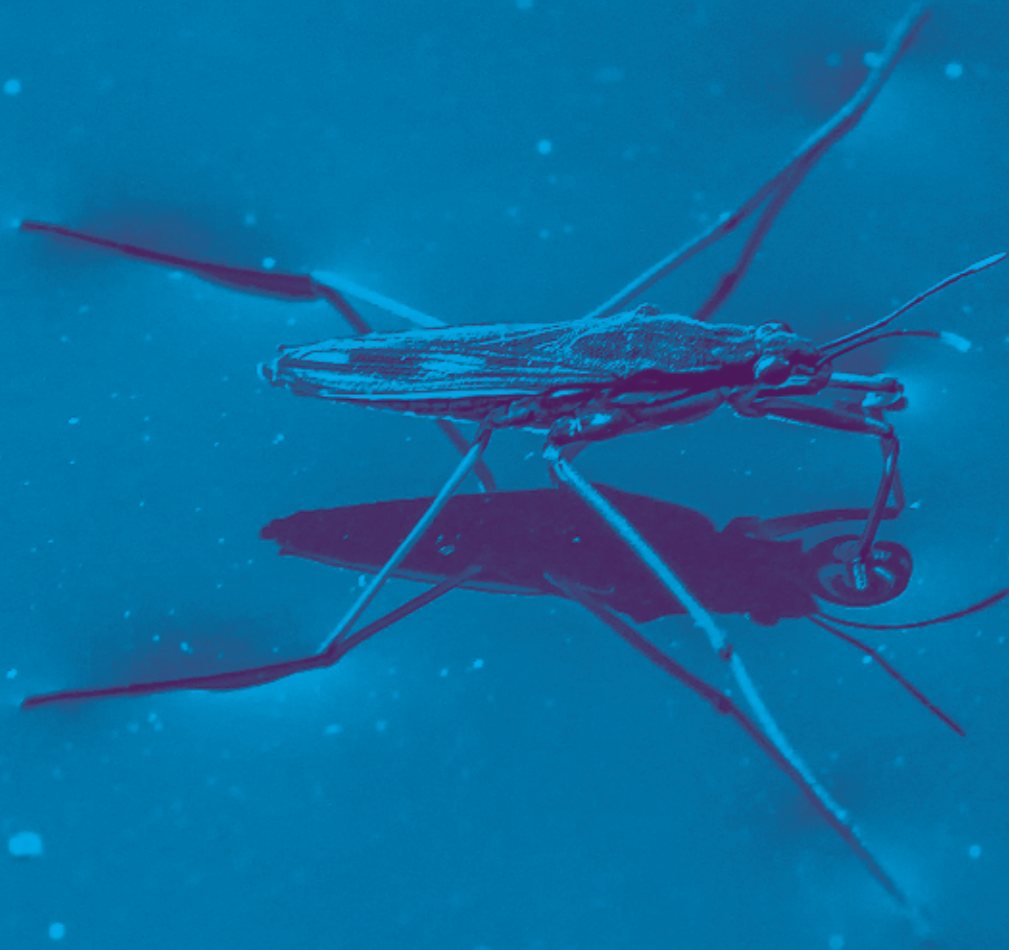
Astrofysici hebben verscheidene onderscheidbare reactiepaden ontdekt waarmee watermoleculen in de ruimte kunnen ontstaan. In koele interstellaire gaswolken die door supernova's in de ruimte zijn verspreid, is de meest voorkomende reactie die tussen geïoniseerde (elektrisch geladen) waterstofmoleculen en zuurstofatomen. Het begint met de vorming van H_3^+ -ionen, doordat neutrale waterstofmoleculen (H_2) worden bestookt door energierijke kosmische straling (de extra H is een positief geladen proton, ofwel waterstofkern, uit de kosmische straling). De H_3^+ -ionen reageren met zuurstofatomen in het gas, daarbij OH^+ -ionen en moleculair waterstof vormend. Na een paar daaropvolgende uitwisselingen tussen moleculen en ionen is het resultaat de vertrouwde neutrale (ongeladen) watermoleculen. De H_3^+ -ionen die deelnemen aan deze reacties, bevatten met grotere waarschijnlijkheid



De belangrijkste reactie waarmee water wordt gemaakt in gaswolken draait om moleculen en ionen.

AAN DE WATERKANT

'Vaak worden grenzen gezien als passieve voorwerpen, of eenvoudigweg gewoon als randen. Maar een grens oefent een actieve invloed uit.' Schrijver en activist Jane Jacobs schreef deze woorden in haar geprezen boek *The Death and Life of Great American Cities*. Wat voor steden geldt, geldt ook voor water: het is aan de grensvlakken met andere stoffen dat deze alom aanwezige en cruciale stof het meest invloedrijk, het meest actief is. Het oppervlak van vloeibaar water bijvoorbeeld is waar zuurstofgas en koolstofdioxidegas binnenkomen en weggaan – van wezenlijk belang voor de aardse biosfeer; het is het oppervlak van ijs dat het glad maakt; het is aan het grensvlak tussen water en vaste stoffen waar water bevochtigt, of niet bevochtigt, waar metalen corroderen. Er kunnen ook een soort grenzen voorkomen binnen de bulk van vloeibaar water – tussen water en stoffen die er wel of niet mee willen mengen of erin willen oplossen. Het feit dat water bestaat uit kleine polaire moleculen (met een ongelijke verdeling van elektrische lading) betekent dat er een enorm aantal andere elementen en verbindingen in kan oplossen – zoveel dat water vaak het 'universele oplosmiddel' wordt genoemd.



Het oppervlak verbreken

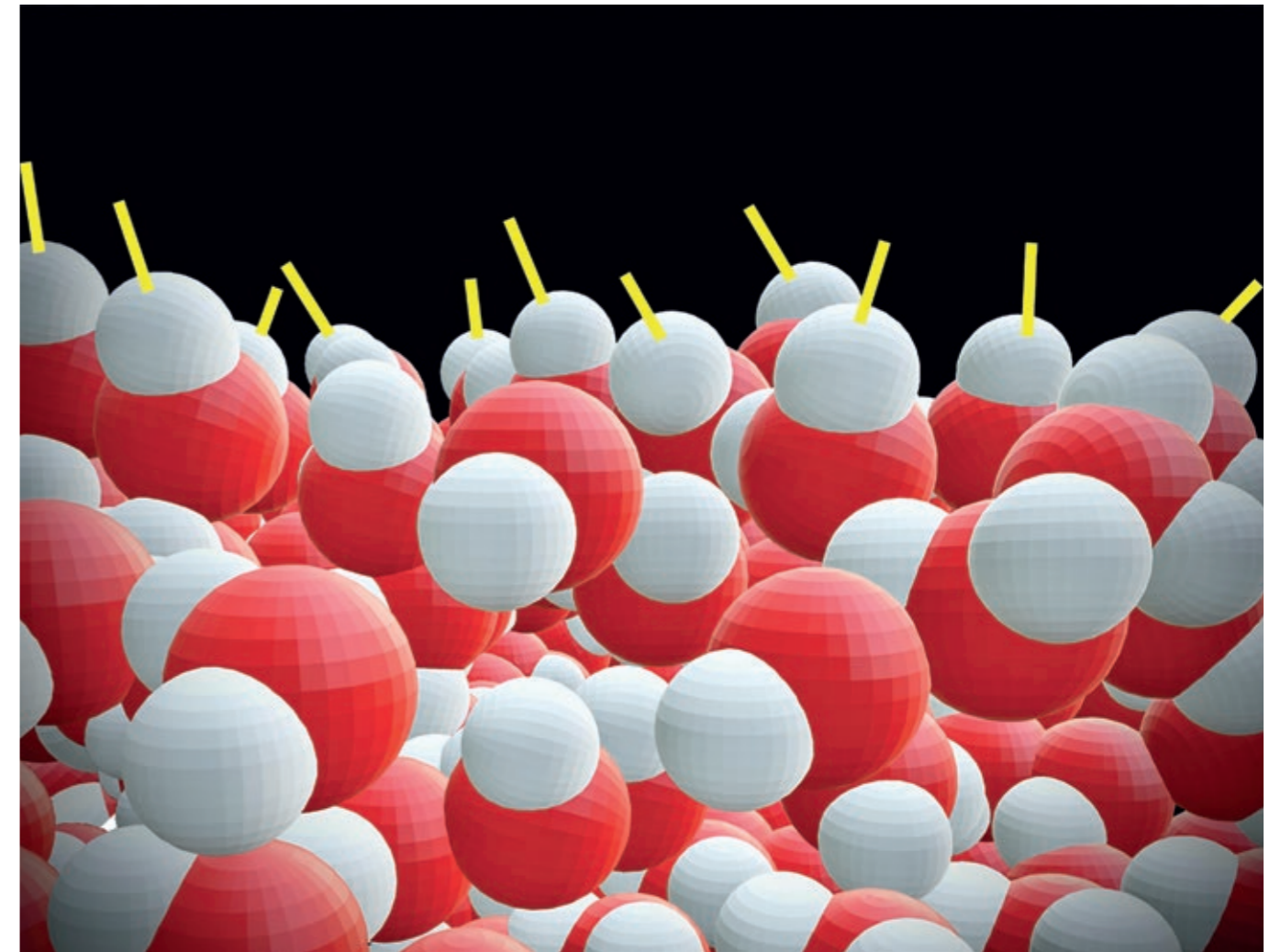
Het oppervlak van water is wat bepaalt hoe water aanvoelt – kleverig maar glad, als de moleculen vastkleven aan je vingers maar ook over elkaar stromen. Het oppervlak van vloeibaar water is ook een plek voor een hectische wisselwerking tussen water en lucht, waarbij moleculen naar het oppervlak gaan en zich weer verwijderen. Met zijn aanleg voor het oplossen en afgeven van gassen is het grensvlak tussen water en lucht van groot belang in de biologie, scheikunde en milieu- en klimaatwetenschap. Aangezien het oppervlak van water vrij ligt en toegankelijk is, is er volop gelegenheid om het te bestuderen – en bestudering van de precieze aard van het water-luchtgrensvlak kan ingenieurs, geologen en materiaalswetenschappers helpen informeren over het gedrag van het grensvlak tussen water en andere materialen. Maar het is jammer voor ze dat de structuur van het wateroppervlak net zo lastig is om uit te zoeken als de structuur binnen vloeibaar water, zo niet lastiger.

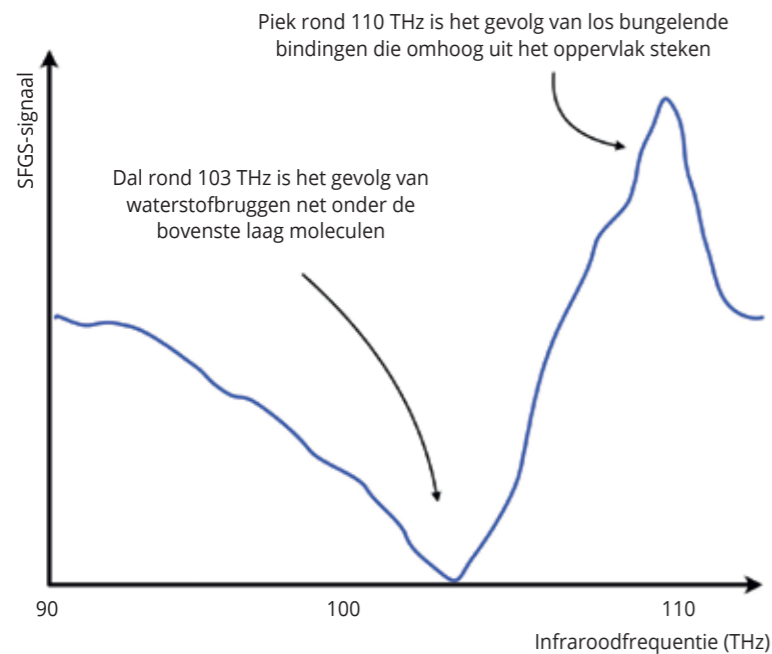
Het tetraëdervormige bindingspatroon van watermoleculen in vast en vloeibaar water, dat we hebben verkend in hoofdstuk 4, is verstoord, geknot, aan het water-lucht- of ijs-luchtoppervlak. Aan het oppervlak bevinden zich moleculen daaronder en naar opzij, maar niet erboven, zodat het gemiddelde aantal waterstofbruggen per molecuul verminderd is. Het gevolg is dat er veel vrije valentiebindingen zijn – mogelijke bindingsplekken die onbezet zijn (in dit geval, mogelijke waterstofbruggen). Elke vrije valentiebinding onthult ofwel de partieel negatieve lading van een vrij elektronenpaar of elektronen op een zuurstofatoom, of de partieel positieve lading van een waterstofatoom; vrije valentiebindingen maken water aan het oppervlak reactiever dan water binnen in de watermassa. Afhankelijk van hun oriëntatie steken de watermoleculen aan het oppervlak hun waterstofatomen of hun vrije elektronenparen naar boven uit. Bestudering van de vrije valentiebindingen geeft het beste inzicht in het karakter en de structuur van het oppervlak van water.

Als waterstofbruggen afwezig zijn, wordt de covalente H-O-binding korter en sterker. Een techniek genaamd somfrequentiegeneratiespectroscopie (SFGS) is gevoelig voor de lengte van de O-H-binding en kan wetenschappers een goed idee geven van welk deel van de moleculen waterstofbruggen heeft en de bijbehorende oriëntatie. SFGS kan ook worden gebruikt voor het onderzoeken van de libratiemodus¹ (zie hoofdstuk 3) waarbij moleculen heen en weer rond hun waterstofbruggen draaien. Deze techniek is het belangrijkste en meest effectieve gereedschap voor wetenschappers die de aard van het vloeistof-luchtoppervlak van water onderzoeken. Bij SFGS wordt doorgaans het oppervlak blootgesteld aan een bundel infraroodstraling die binnen een bepaald bereik aan frequenties kan worden afgestemd. Bij bepaalde frequenties zal de invallende straling resoneren (meetrillen) met het uitrekken en ontspannen van de covalente O-H-binding in watermoleculen (een van de trilwijzen die we in hoofdstuk 3 zagen). Tegelijkertijd schijnt zichtbaar laserlicht met een vaste frequentie op het oppervlak. De twee bundels wisselwerken en de resulterende som van hun frequenties wordt vastgelegd, een spectrum opleverend dat informatie over de bindingen

bevat. Deze techniek is vooral nuttig bij oppervlakken, omdat bijdragen aan het spectrum door moleculen binnen in de watermassa worden uitgesloten. Hoewel SFGS een praktisch gereedschap bij een experiment is, levert zij ook inzicht in de oppervlaktestructuur als het wordt gesimuleerd in computermodellen. Dergelijke modellen kunnen worden gebruikt om een virtueel SFG-spectrum te maken – en bepaalde kenmerken van het spectrum kunnen worden teruggevoerd op moleculaire wisselwerkingen of oriëntaties binnen het model. Als vervolgens die kenmerken verschijnen in werkelijke SFG-spectra, kunnen de experimentatoren die vol vertrouwen interpreteren.²

Model van het toplaagje aan het oppervlak van vloeibaar water. Bij de moleculen bovenin, met onvolledige, vrije valentiebindingen, wijst met grotere waarschijnlijkheid een van hun waterstofatomen naar boven uit het oppervlak dan hun zuurstofatoom.





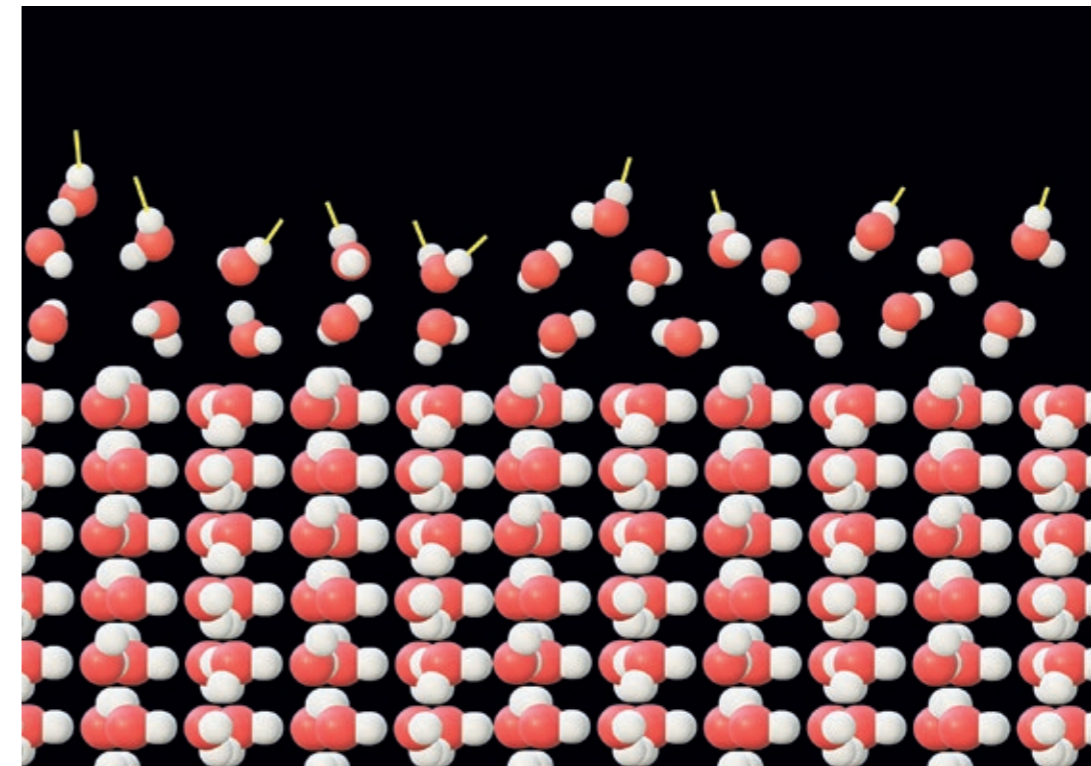
Nabootsing van een vereenvoudigd SFG-spectrum van het oppervlak van vloeibaar water. De horizontale as geeft de frequentie van de aftastende infraroodstraling weer in terahertz, of biljoenen trillingen per seconde. (Deze waarden zijn omgezet uit een eenheid die spectroscopisten gewoonlijk gebruiken, het golfgetal.) De verticale as toont het SFG-signaal – opnieuw zouden spectroscopisten een andere eenheid gebruiken, die ze susceptibiliteit noemen. De kromme zelf is ook vereenvoudigd, en toont alleen de belangrijkste piek en het belangrijkste dal overeenkomend met respectievelijk de aanwezigheid of afwezigheid van een waterstofbrug boven het oppervlak, en oriëntatie. Fijnere details in het spectrum geven uitdagende, onopgehelderde aanwijzingen over de aard van het oppervlak van water.

De resultaten van SFGS en simulaties aan het oppervlak van vloeibaar water doen vermoeden dat het gemiddelde aantal waterstofbruggen per molecuul net iets groter dan 3 is.³ Binnen vloeibaar water is het gemiddelde aantal waterstofbruggen per molecuul dichterbij 4 (doorgaans ongeveer 3,7). Moleculen aan het oppervlak laten met een grotere waarschijnlijkheid de H van hun covalente O-H-bindingen naar boven in de lucht uitsteken. De waterstofbruggen die ontstaan aan het oppervlak, vormen een grotendeels tweedimensionaal netwerk, met ringen van vier, vijf of zes watermoleculen⁴ – dus het oppervlak van vloeibaar water heeft enige structuur, enige mate van orde ondanks het feit dat water en andere moleculen voortdurend de vloeistof daar verlaten of erbij komen. Ondanks die schijnbare tweedimensionale allerbovenste laag is het oppervlak van water geen scherpe grens tussen de lucht erboven en de vloeistofmassa eronder. Er bestaat een onderscheidbare laag, waarvan de precieze diepte zich moeilijk laat bepalen en definiëren, waarin er een afname is van de dichtheid van de watermassa naar de lucht en een variatie van verscheidene kenmerken van water, over op zijn minst een nanometer (10 Å, gelijkwaardig aan drie watermoleculen op een rij). De uiterste bovenzijde van het oppervlak draagt een kleine positieve elektrische lading, waarschijnlijk als gevolg van de waterstofatomen aan het eind van de vrije O-H-bindingen – maar in zijn geheel heeft de oppervlaktelaag een kleine negatieve lading, terwijl de watermassa daaronder ietwat positief is. Niemand weet zeker wat de oorsprong van die ladingsscheiding is, of de precieze aard ervan. De invloed van die

afwijkingen van de eigenschappen van de watermassa strekt zich uit tot vele nanometers onder het onmiddellijke oppervlak. Er blijft echter nog veel onbekend over de oppervlaktelaag bovenaan water, en voortdurend worden onderzoeken uitgevoerd bij de zoektocht naar het karakteriseren en begrijpen van deze belangrijke moleculaire omgeving die we elke dag van ons leven tegenkomen.

Glibberen en glijden

Net zoals bij vloeibaar water heeft het oppervlak van ijs ook geen scherpe grens en is het een onderwerp voor experimenten en discussies. Hier is het de oppervlaktelaag wat ijs glad maakt. Zoals genoemd in hoofdstuk 4, wordt de gladheid van ijs vaak toegeschreven aan het feit dat ijs onder druk smelt – en dat het staan op de scherpe ijzers van een schaats voldoende druk uitoefent om het ijs te doen smelten. Volgens deze hypothese, voor het eerst in de jaren tachtig van de negentiende eeuw opgesteld, zou het smelten onder druk leiden tot een dunne laag vloeibaar water die het oppervlak zou smeren, waardoor schaatsen gracieus kunnen glijden.⁵ Duidelijk is dat lichte voorwerpen zoals ijshockeypucks, die niet veel druk uitoefenen, ook gemakkelijk glijden en schuiven over het ijs – een groot probleem



Model van de bovenste toplaag van vloeibaar water. Moleculen in de quasivloeibare laag hebben verbroken of verstoorde waterstofbruggen, en de vrije valentiebindingen zijn opnieuw waarschijnlijk de waterstofatomen die omhoog uit het oppervlak steken.