

IJs, maar dan anders

IJs is ijs, zou je zeggen. Maar nee: er zijn bijna twintig manieren bekend waarop water kan bevriezen. Een van die manieren is wel heel bijzonder: die levert ijs op dat heet en zwart is, en stroom kan geleiden. In aardse labs kost het behoorlijk wat moeite om dit goedje te maken, maar wie weet is het wel de meest voorkomende vorm van waterijs in ons heelal.

Tekst: Marysa van den Berg

Afgelopen jaar vuurden wetenschappers op het Argonne National Laboratory in de VS een extreem krachtige röntgenlaser af op een waterdruppel, die werd vastgehouden tussen twee superscherpe diamantpunten. Dit zorgde voor een temperatuur van 4700 graden Celsius – bijna de oppervlaktetemperatuur van de zon. De druk in de druppel liep bovendien op tot 20 gigapascal – 200.000 maal de druk van onze eigen atmosfeer.

Onder deze omstandigheden veranderde het vloeibare water voor enkele tellen in heet, zwart en extreem geleidend ijs – superionisch ijs. Een volgende röntgenstraal onthulde de bizarre structuur van dit spul. Wat maakt dit ijs zo bijzonder? En wat kunnen we er eigenlijk mee?

Controversiële theorie

Materie kan vast, vloeibaar of gasvormig zijn, zo leren we al op de middelbare school. Maar daarnaast bestaan er nog diverse kristalfasen. In een kristal zijn de atomen periodiek gerangschikt in een vast rooster. Dat wil zeggen: hetzelfde patroon keert steeds terug. Als water bevriest, krijg je ijs met een bepaalde kristalstructuur. Deze fase wordt gewoonweg ijs I genoemd. Ijs I bestaat uit kristallen die hexagonaal (zeshoekig) zijn geordend. Daarna volgen ijs II, met een kristalstructuur van ‘schuine kubussen’, tot en met het in 2021 ontdekte ijs XIX. Superionisch ijs heeft nummer XVIII, oftewel achttien, meegekregen. Al in 1988 werd het bestaan van superionisch ijs voorspeld. Dit gebeurde toen aan de hand van computermodellen die nog vrij ‘simpele’ natuurkunde toepasten, zoals atoombindingen en interacties tussen positieve en negatief geladen deeltjes. Latere simulaties gebruikten ingewikkeldere concepten zoals quantummechanica, en duiden met een grotere betrouwbaarheid op het bestaan van superionisch ijs. Maar zulke theoretische voorspellingen zijn nogal afhankelijk van benaderingen. Voor hetzelfde geld was het hele idee van heet, zwart ijs een foutje in het wiskundige model, veroorzaakt door een verkeerde benadering. “De theorie achter superionisch ijs was dus nogal controversieel”, zegt Vitali Prakapenka. Hij is experimenteel natuurkundige aan de Universiteit van Chicago in de VS en leidt het eerdergenoemde project dat eind vorig jaar heet, zwart ijs voor enkele tellen liet bestaan. “Wij vroegen ons af: kunnen waterkristallen überhaupt wel bestaan onder zulke extreme omstandigheden – bij zo’n hoge temperatuur en onder zo’n enorme druk?”

Schokgolf

Om daarachter te komen, zit er maar één ding op: zulke extreme omstandigheden nabootsen in het lab. Prakapenka was niet de eerste die zo’n experiment op poten zette. Het team van experimenteel natuurkundige Federica Coppari van het Lawrence Livermore National Laboratory, ook in de VS, ging hem voor. Net als haar latere concurrent zette Coppari een druppel water vast tussen twee diamanten. Eerst werd de druk opgevoerd tot 1 gigapascal, een tien keer zo hoge druk als op het diepste punt van de oceanen. Het water transformeerde toen

in een ondoorzichtig kristal met de vorm van een uitgerekte kubus: ijs VI. Bij 2 gigapascal ontstond het doorzichtige ijs VII, met een kubusvormig kristalrooster.

Uiteindelijk schoten de onderzoekers met een ultraviolette laser op het monster. “Op het moment dat de laser het oppervlak van de diamant raakt, oxideert er een stukje”, legt Coppari uit. Dat wil zeggen: wat van de koolstof waar de diamant uit bestaat, vormt samen met zuurstof koolstofdioxide. “Daarbij schiet de diamant weg in de tegenovergestelde richting als het koolstofdioxide. Zo ontstaat een schokgolf die door het ijs trekt. Dat levert genoeg hitte en druk op om heet, zwart ijs te laten ontstaan.”

Dat stelde Coppari en haar collega's althans na afloop van het experiment vast. Het goedje smolt namelijk een fractie van een seconde na de creatie – door de temperatuur van 4700 graden Celsius en de druk van meer dan 100 gigapascal die de schokgolf creëerde.

Zwemmende protonen

Bij het experiment van Prakapenka waren de omstandigheden minder extreem én bestond het stukje superionisch ijs langer. “Door speciale 0,2 karaatsdiamanten te gebruiken (0,2 karaat is 40 milligram – red.) konden we de druk langer volhouden en bleek 20 gigapascal al genoeg”, zegt Prakapenka. “En doordat het hete, zwarte ijs langer bestond – zo'n tien tellen – konden we de structuur bepalen.”

Die structuurbepaling kon het team doen door er een tweede maal met een röntgenlaser op te vuren. De manier waarop de atomen in het ijsmonster deze straling afbuigen, wordt geregistreerd door een detector. Vervolgens kan een computer met die informatie een gedetailleerd beeld opbouwen van de rangschikking van de atomen.

Zo kwam de bijzondere kristalstructuur van ijs XVIII aan het licht. Bij superionisch ijs zijn de watermoleculen door de extreme omstandigheden in tweeën gebroken: waterstofionen (positief geladen waterstofatomen; in feite losse protonen) en zuurstofionen (negatief geladen zuurstofatomen). “Bijzonder is verder dat het ijs deels vast en deels vloeibaar is”, zegt Coppari. “De zuurstofionen vormen een gelijkmatig, vast rooster, terwijl de protonen daartussen ‘rondzwemmen’, als een soort vloeistof.”

Pikzwart

Het bestaan van deze vrij bewegende protonen verklaart een van de bijzondere eigenschappen van superionisch ijs: hoe goed het geleidt. Normaal gesproken zijn in een elektrisch circuit elektronen de dragers van elektrische energie. Maar in dit geval spelen de protonen die rol. Wanneer je een elektrische spanning op zo'n superionisch ijsblokje zet, reizen die naar de negatieve pool. Hierbij ontstaat uiteindelijk elektriciteit. “Heet, zwart ijs gedraagt zich als een metaalgeleider – denk aan een koperen elektriciteitsdraad – maar dan onder omstandigheden waarbij een gewoon metaal allang zou zijn gesmolten”, zegt Prakapenka.

Daarnaast weegt het spul vier keer zo veel als gewoon waterijs uit de vriezer. Coppari denkt dat dit komt door het vaste stramien van het atoomrooster. “De atomen worden tegen elkaar aangeduwd, waardoor de dichtheid toeneemt.” Een derde unieke eigenschap van superionisch ijs is dat het pikzwart lijkt te zijn. Dat blijkt uit lichtmetingen bij de experimenten van zowel Prakapenka als Coppari. “Bijna al het licht wordt geabsorbeerd”, zegt Coppari. “Daardoor kan het ook zo heet worden.”

Dat is nog niets alles. Want niet elk heet, zwart ijs is hetzelfde. Er blijken twee typen te bestaan. In het schokgolfexperiment van het team van Coppari ontstond een zogenoemd aangezicht-gecentreerd rooster van ijs XVIII. “In dat geval zitten de zuurstofatomen op de hoeken van de kubus én zit er een in het midden van elk vlak van de kubus”, legt Coppari uit. Bij het röntgenexperiment vonden Prakapenka en collega's naast de aangezicht-gecentreerde

versie ook een zogenoemd lichaams-gecentreerd rooster. “In dat geval bevinden de zuurstofatomen zich op de hoeken én in het midden van de kubus”, zegt Coppari. Waarom precies het verschil in rangschikking in beide experimenten is ontstaan, is nog niet helemaal duidelijk, geven zowel Coppari als Prakapenka aan. Maar mogelijk heeft het te maken met het verschil in de toegepaste druk; die was voor het röntgenexperiment een stuk lager.

Vast binnenste

En wat hebben we aan al deze informatie? Die kan ons bijvoorbeeld meer kennis opleveren over de samenstelling van andere planeten. Want volgens planeetwetenschappers bestaan reuzenplaneten als Uranus en Neptunus voor een groot deel uit water. Niet zomaar water, maar water onder extreme druk en temperatuur. “Volgens onze berekeningen kan superionisch ijs onder die omstandigheden stabiel zijn”, zegt Prakapenka. “En dus denken we dat superionisch ijs een belangrijk bestanddeel vormt van de binnenkant van sommige gasplaneten. In ons eigen zonnestelsel, maar ook daarbuiten, bij exoplaneten. Superionisch ijs zou weleens de meest voorkomende vorm van water kunnen zijn in het heelal.”

Dat is niet alleen maar een leuk feitje, het zou ook een verklaring kunnen zijn voor het vreemde magnetisch veld van Uranus en Neptunus. Hete vloeistoffen, zoals metalen, stromen van en naar de polen, een proces dat mantelconvectie wordt genoemd. Tijdens dit stromen nemen ze ook elektronen met zich mee. Door de constante beweging van deze geladen deeltjes in het binnenste van de planeet ontstaat een gelijkmatige opwekking van het magneetveld. De richting van dit magneetveld is vervolgens grofweg hetzelfde als die van de rotatieas. Maar op Uranus en Neptunus is de situatie complexer. Deze ijzige gasreuzen hebben meerdere polen, wat een vreemde vorm geeft aan het magneetveld. Bovendien wijkt de richting van het magnetische veld flink af van de richting van de rotatieas.

Deze gekke eigenschappen kunnen alleen bestaan als Uranus en Neptunus een deels vast binnenste hebben. En dat leek tot voor kort haast onmogelijk, volgens planeetwetenschappers. De nieuwe experimenten onder extreme omstandigheden brengen daar verandering in. “We vermoeden nu dat vast superionisch ijs de mantel van deze reuzenplaneten grotendeels opvult. Het gaat dan vooral om de aangezicht-gecentreerde variant, want die past het beste bij de druk- en temperaturomstandigheden die hier heersen”, zegt Coppari. “Dan blijft er nog slechts een dunne buitenste schil over. Daar kan de druk en temperatuur laag genoeg zijn voor vloeibaar materiaal om te stromen en het unieke magneetveld te genereren dat we bij deze planeten zien.”

Superharde materialen

Planeetwetenschappers kunnen dus hun lol op met deze nieuw ontdekte kristalfase van water. Maar ook op aarde kan heet, zwart ijs nuttig blijken. Misschien niet het spul zelf – vooralsnog lijkt het niet te kunnen bestaan zonder extreme druk en temperatuur – maar wel de superionische toestand. Andere superionische materialen dan ijs XVIII zijn nog niet gemaakt, maar volgens computermodellen is dat wel mogelijk. “Stoffen in deze bijzondere fase kunnen unieke fysieke en chemische eigenschappen bezitten”, zegt Prakapenka. “En daar kunnen we handig gebruik van maken. Denk aan superharde materialen om industriële processen te verbeteren, of aan supergeleiders op kamertemperatuur voor de elektronicamarkt.”

Tot die tijd vinden zowel Prakapenka als Coppari het al spannend genoeg om superionisch ijs te blijven maken en bestuderen. “Ik wil meer ontdekken over hoe die protonen nu precies elektrische ladingen verplaatsen”, zegt Prakapenka. “Ook ben ik benieuwd of dit ijs chemische reacties aangaat met andere stoffen. Het binnenste van Uranus en Neptunus zou volgens voorspellingen bijvoorbeeld ook ammonia bevatten. Wat gebeurt er als superionisch

ijs en ammonia samenkomen?” En Coppari wil graag water op nóg hogere druk gaan brengen. “Want wie weet bestaan er nog wel meer superionische ijsfases.”

Marysa van den Berg is wetenschapsjournalist. Voor dit artikel raadpleegde ze onder meer de volgende bronnen: Marius Millot, Federica Coppari e.a.: *Nanosecond X-ray diffraction of shock-compressed superionic water ice*, Nature (8 mei 2019) | Vitali Prakapenka e.a.: *Structure and properties of two superionic ice phases*, Nature Physics (14 oktober 2021).

[kader]

superionisch ijs ontrafeld

Benodigde druk: 20 tot 200 gigapascal

Benodigde temperatuur: 4700 graden Celsius

Zwart van kleur door lichtabsorptie

Waterstofionen ‘zwemmen rond’ en kunnen stroom geleiden

Zuurstofionen zitten vast in kristalrooster

Een ijsblokje is viermaal zo zwaar als gewoon ijs

[Links voor website KIJK:](#)

[Superionic water - Wikipedia](#)

[Black, Hot Ice May Be Nature’s Most Common Form of Water | Quanta Magazine](#)

[Scientists find strange black ‘superionic ice’ that could exist inside other planets | University of Chicago News \(uchicago.edu\)](#)

[Hot black ices | Nature Physics](#)

[Federica Coppari Uses a Giant Laser to Look Inside Exoplanets | Quanta Magazine](#)