

1

De chemische aarde

HET ONTSTAAN VAN
EEN PLANEET



In den beginne was er... Tja, wat eigenlijk? Een stip, een punt, een vlek: ongelooflijk klein en tegelijkertijd onvoorstelbaar dicht. Het was geen plaatselijke concentratie van materie in de uitgestrekte leegte van het universum. Het wás het universum. En hoe het daar kwam, weet niemand.

Wat ervoor kwam – als er al iets voor kwam – is al even onbekend, maar zo'n 13,8 miljard jaar geleden begon deze oerkern van het universum zich razendsnel uit te breiden. Dat was de 'oerknal', een immense expanderende golf van energie en materie. Het ging hierbij niet om gesteente of mineralen zoals wij die kennen, zelfs niet om de atomen waar het gesteente, de lucht en het water uit bestaan. Bij het begin van ons universum bestond de materie uit quarks, leptonen en gluonen, een vreemd samenspel van subatomaire deeltjes die uiteindelijk zouden samenklonteren tot atomen.

We danken onze kennis van het universum en zijn geschiedenis grotendeels aan de meest ongreepbare bron van allemaal, het licht. Je zou het misschien niet zeggen als je die flonkerende speldenknopjes aan de nachtelijke hemel ziet, maar licht heeft twee eigenschappen die ons helpen te begrijpen hoe het universum zich heeft ontwikkeld. Ten eerste kunnen we uit de verschillende golflengtes opmaken uit welke bron de lichtgolven afkomstig zijn. Met onze ogen kunnen we maar een klein deel van de lichtgolven waarnemen, maar sterren en

andere hemellichamen zenden een veel breder spectrum aan straling uit, van radio- tot micro- en gammagolven, of absorberen die. En elk type golf leert ons iets anders. Ten tweede, en dat is belangrijk: licht heeft een strikte maximumsnelheid: 299.792.458 meter per seconde (in de ruimte). Het licht van de zon wordt acht minuten en twintig seconden voordat wij het zien uitgezonden. Bij andere sterren en hemellichamen zit daar meer tijd tussen, en bij de verste objecten heel veel meer. Daardoor kunnen we terugkijken in de tijd en is ons firmament een hemels geschiedenisboek.

De kosmische achtergrondstraling die overal in het heelal gelijkelijk voorkomt, vertelt ons van alles over de oerknal en wat daar onmiddellijk op volgde, en de straling van de eerste generatie sterren, die maar een paar duizend jaar na het begin van de tijd ontstonden, bereikt ons nu pas. Hoe zijn die eerste sterren ontstaan? Dat heeft alles te maken met de zwaartekracht, de bouwmeester van het universum. Zwaartekracht is de aantrekkingskracht tussen verschillende objecten, waarbij de mate van aantrekking wordt bepaald door de massa van en de afstand tussen die objecten. Toen zich in het jonge, snel uitdijende universum atomen vormden, werden die door de zwaartekracht naar elkaar toe getrokken. Er vormden zich hier en daar samenklonteringen die door hun grotere massa ook een sterkere zwaartekracht uitoefenden en die mettertijd ineens stortten tot hete, dichte bollen: zo heet en dicht, dat de waterstofatomen samensmolten tot helium, waarbij licht en warmte vrijkwamen. Als dat gebeurt, ontstaat er een ster. Die oersterren waren groot, heet en bestonden maar kort, maar ze

vormden wel het begin van alles wat nog komen zou, inclusief de mens.

De materie die uit de oerknal voortkwam bestond voornamelijk uit waterstofatomen, het simpelste element, wat deuterium (waterstof met een extra neutron) en helium. Er ontstond ook een heel klein beetje lithium, en nog kleinere hoeveelheden van andere lichte elementen. Dat was het wel zo'n beetje. Maar er moet nog iets zijn ontstaan, al weten we nog steeds niet goed wat. In de jaren vijftig begonnen astronomen de beweging van sterren en sterrenstelsels (samenklontering van sterren, gassen en stof, eveneens bijeengehouden door de zwaartekracht) te gebruiken om de werking van de zwaartekracht in de ruimte te berekenen. Maar toen ze de massa van alle bekende objecten bij elkaar hadden opgeteld, constateerden ze dat dat minder was dan ze op grond van hun observaties verwachtten. Er moest nog iets zijn, iets wat via de zwaartekracht invloed uitoefent op de materie, maar niet interageert met licht. De astronomen noemden het 'donkere materie'. Ook vandaag de dag hebben astronomen allerlei theorieën over donkere materie, maar meer dan theorieën zijn het voorlopig niet. Nog raadselachtiger dan de donkere materie is de zogenoemde donkere energie, die ook nodig is om de werking van het universum te verklaren. Bij elkaar vormen donkere materie en donkere energie 95 procent van alles wat er bestaat. Deze raadselachtige bestanddelen kunnen we niet waarnemen, maar men denkt dat ze een belangrijke rol hebben gespeeld bij het ontstaan van het universum. We hebben kortom nog veel te leren.

Maar laten we teruggaan naar de gewone materie. Toen de eerste sterren licht begonnen uit te stralen, was het universum een kille, diffuse cocktail van (vooral) waterstofatomen. De vroege sterren brachten helium voort, maar er was nog niets waar je een aarde van kon maken (tabel 1). Waar komt het ijzer, het silicium en de zuurstof vandaan die daarvoor nodig waren? En de koolstof, stikstof, fosfor en al die andere elementen waar ons lichaam uit bestaat? Deze en andere elementen ontstonden in de daaropvolgende generaties sterren; daar werden de atomen gesmeed waar ooit de aarde uit zou bestaan. Door de hoge temperatuur en druk in de kern van grote sterren smolten lichtere elementen samen tot koolstof, zuurstof, silicium en calcium. En in de enorme sterexplosies die we supernova's noemen, ontstonden vervolgens de zwaardere elementen als ijzer, goud en uranium. Het gezicht dat u in de spiegel ziet is misschien een paar decennia oud, maar het bestaat uit elementen die miljarden jaren geleden in oeroude sterren zijn gevormd.

Gedurende de immense duur van de tijd ontstonden sterren en vonden ze de dood, en bij elke cyclus kwamen er nieuwe elementen bij, totdat we de elementen hadden die we nu in de aarde en het leven aantreffen. Sterrenstelsels versmolten en er verschenen zwarte gaten (gebieden met zo'n hoge dichtheid dat er geen licht aan kan ontsnappen); het universum dat we vandaag om ons heen zien, kreeg langzaam vorm.

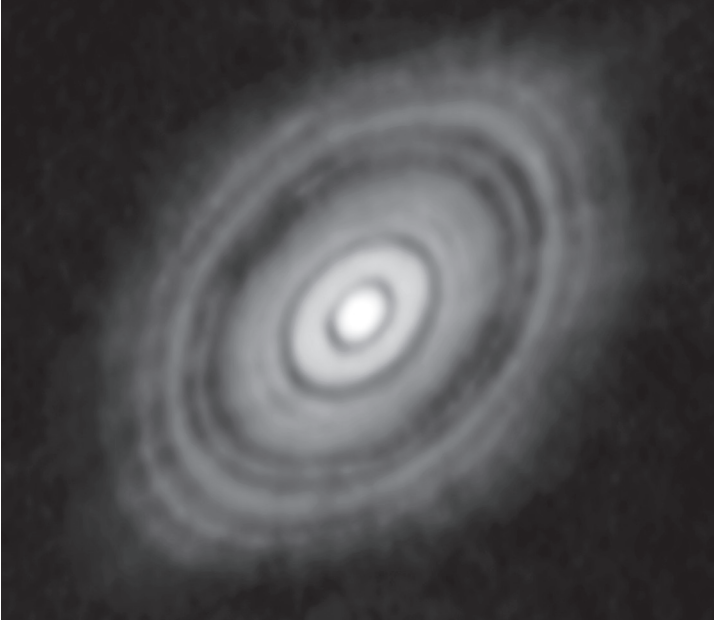
Rond 4,6 miljard jaar geleden pikken we ons verhaal weer op, en we richten ons daarbij op een bescheiden wolk van waterstofatomen en kleinere hoeveelheden gas, ijs en korreltjes

SAMENSTELLING VAN DE ELEMENTEN
WAARUIT DE AARDE EN HET LEVEN BESTAAN
(In %, naar gewicht)

DE AARDE	
Ijzer	33.0
Zuurstof	31.0
Silicium	19.0
Magnesium	13.0
Nikkel	1.9
Calcium	0.9
Aluminium	0.9
Overige	0.3
LICHAAMSCELLEN VAN DE MENS	
Zuurstof	65.0
Koolstof	18.0
Waterstof	10.0
Stikstof	3.0
Calcium	1.5
Fosfor	1.0
Overige	1.5

mineralen. Die wolk bevond zich in een arm van een opvallend spiraalvormig sterrenstelsel, de Melkweg. Eerst was de wolk groot, diffuus en koud (echt koud, met temperaturen van 10-20 graden kelvin (min 263 tot min 253 graden Celsius)). Maar misschien onder invloed van een naburige supernova implodeerde de wolk tot een veel kleinere, hetere en dichtere nevel. Zoals elders in het universum al miljoenen keren was gebeurd, werd door de zwaartekracht de meeste materie in de wolk samengebald tot een hete, dichte centrale massa: de zon. De zuurstof in de nevel kwam grotendeels in de zon terecht, maar het ijs en de stukjes mineraal vormden zich tot een schijf die rond de kersverse ster draaide, enigszins gelijkend op de ringen van kleine deeltjes die vandaag de dag om Saturnus cirkelen (figuur 1). Aanvankelijk was de schijf warm genoeg om de mineralen en het ijs waaruit ze was ontstaan te laten verdampen. Maar na een paar miljoen jaar begon de schijf af te koelen, sneller aan de koelere buitenkant en langzamer dichterbij de warmte van de zon.

We weten uit onze dagelijkse ervaring dat verschillende stoffen bij bepaalde temperaturen smelten, dan wel vast worden. Op het aardoppervlak bevriest water bij een temperatuur van 0°C, maar kooldioxide wordt pas bij -78°C vast (droogijs). De mineralen in gesteenten worden vast bij temperaturen van honderden tot meer dan duizend graden. Dus toen de protoplanetaire schijf afkoelde, namen de verschillende stoffen op verschillende plaatsen en tijden hun vaste toestand aan, steeds afhankelijk van hun afstand tot de zon. De oxiden van calcium, aluminium en titanium vormden zich eerst; toen de



FIGUUR 1. Op deze bijzondere foto, gemaakt met de Atacama Large Millimeter Array, is HL Tauri afgebeeld, een jonge ster die lijkt op onze zon, nog met zijn protoplanetaire schijf. De ringen en de 'gaten' op de foto worden veroorzaakt door planeten in ontwikkeling, die hun banen schoonvegen van stof en gas. Ons eigen zonnestelsel zal er 4,54 miljard jaar geleden ongeveer zo hebben uitgezien.

metalen ijzer, nikkel en kobalt, en pas later, voorbij de afstand tot de zon die de vorstlijn wordt genoemd, water, kooldi- en -monoxide, methaan en ammoniak in bevroren vorm: de stoffen waar de zee en de lucht uit bestaan en die leven mogelijk maken. Stukjes mineraal en ijs klonterden samen tot grotere deeltjes, en die balden zich op hun beurt samen tot nog weer grotere lichamen. Binnen een paar miljoen jaar waren er, waar

eens die schijf had gedraaid, nog maar een handvol grote ballen over. De derde bol, gerekend vanaf de zon, was de aarde, een steenklomp die op een afstand van zo'n 150 miljoen kilometer rond de zon cirkelde.

Hoe precies kreeg de aarde haar vorm, en wat weten we over die begintijd? Zoals we de geschiedenis van het heelal afleiden uit het licht, kijken we voor de historie van onze planeet naar het gesteente. Wie diep de Grand Canyon in staart of zich verwondert over de bergtoppen rond het Lake Louise in Canada, kijkt in de boekenkast van de natuur, gevuld met stenen tafelen waarin de geschiedenis van de aarde staat gegrift. In de stroomgebieden van rivieren en op de zeebodem liggen sedimenten (dat kunnen stenen, zand en modder zijn, gevormd door erosie van ouder gesteente, of kalksteen, ontstaan uit bezinksel in zeeën, rivieren en oceanen), waarin laag voor laag de fysische, chemische en biologische kenmerken van het aardoppervlak zijn vastgelegd op het moment dat ze werden gevormd. Over de dynamiek binnen in onze planeet weten we meer door stollingsgesteenten, die zijn ontstaan uit gesmolten materiaal uit het binnenste van de aarde, en door metamorfe gesteenten, die onder hoge temperatuur en druk binnen in de aarde zijn gevormd uit sedimentair of stollingsgesteente. Samen vertellen deze gesteenten het grote verhaal van de ontwikkeling van de aarde, van het allereerste begin tot nu. Het is het verhaal van de evolutie van het leven, van bacteriën tot de lezer van dit boek, en, misschien wel het machtigste verhaal van allemaal, van de manieren waarop de

fysische en de levende aarde elkaar in de loop van de tijd hebben beïnvloed. Na veertig jaar als geoloog verbaast het me nog steeds dat ik aan de kliffen langs de kust van het Zuid-Engelse Dorset kan aflezen hoe de aarde er 180 miljoen jaar geleden uitzag. En nog verbazingwekkender zijn, zoals we zullen zien, de gesteenten die iets zeggen over de aarde en het leven van miljarden jaren geleden.

Als je de Rocky Mountains en de Alpen goed bekijkt, trekt een ander aspect van de aardgeschiedenis de aandacht. De vorm van deze indrukwekkende gebergten, die wel wat weg heeft van tanden, wijst niet op afzetting van sediment. Integendeel, ze zijn gebeeldhouwd door erosie, een fysisch en chemisch proces waarbij het gesteente langzaam wegslijt, zodat de geschiedenis ervan langzaam wordt uitgewist. De aarde schrijft haar verhaal met de ene hand en wist het met de andere weer uit. En hoe verder we teruggaan in de tijd, hoe meer er is uitgewist. De aarde heeft al zo'n 4,54 miljard jaar geleden haar huidige vorm aangenomen, maar het oudste gesteente dat we kennen is 'maar' zo'n 4 miljard jaar oud. Er moet ouder gesteente hebben bestaan, maar het is geërodeerd of begraven onder het aardoppervlak en door metamorfe processen getransformeerd tot een onherkenbare vorm. Misschien ligt er in een afgelegen gebied in Canada of Siberië nog oeroud gesteente dat we nog moeten ontdekken, maar in het algemeen gesproken zijn de eerste 600 miljoen jaar van de geschiedenis van de aarde een onbekende, 'donkere' periode.

Hoe kunnen we zonder historische gegevens de oertijd van de aarde reconstrueren? Het blijkt dat we 'back-ups' hebben,

die, om het zo te zeggen, op een veilige plek zijn bewaard, en wel in meteorieten. Dat zijn overblijfsels uit het vroege zonnestelsel, stukken rots die af en toe vanuit de ruimte op aarde neerkomen. De mineralen van zulke meteorieten bevatten geologische 'klokken', en op grond van de kennis die daarin besloten ligt, kunnen we met behoorlijke zekerheid concluderen dat de aarde en de andere planeten inderdaad meer dan 4,5 miljard jaar geleden werden gevormd. (Op de datering kom ik zo dadelijk terug.) Bepaalde meteorieten, chondrieten genoemd, bestaan uit korreltjes van misschien een millimeter groot die 'chondrulen' worden genoemd en waarvan we vermoeden dat ze de deeltjes bevatten waaruit in de eerste fasen van planetaire vorming de grotere lichamen ontstonden (figuur 2). Die hypothese wordt ondersteund door zorgvuldig onderzoek aan de bestanddelen van chondrulen, die het calcium, aluminium en titanium bevatten die als eerste condenseerden toen onze zonneshijf afkoelde, maar ook zeldzame deeltjes die door een naburige supernova werden weggeslingerd en vervolgens werden 'opgeveegd' toen het zonnestelsel zich vormde. Chondritische meteorieten bevatten niet alleen een vingerafdruk van het vroege zonnestelsel, hun chemische samenstelling lijkt erop te wijzen dat zij de belangrijkste bouwstenen van de aarde zijn.

Binnen een paar miljoen jaar was het meeste ijs en steen rond de zon samengebald tot planeten. Volgens de gangbare verklaring plakten stofdeeltjes aan elkaar en klonterden die grotere korreltjes vervolgens samen tot nog grotere gehelen en uiteindelijk tot planetesimalen, rotsblokken van ongeveer een kilometer doorsnee, te vergelijken met veel van de



FIGUUR 2. De Allende-meteoriet, een koolstofchondriet die in 1969 op aarde neerkwam. De korrels in de steen zijn chondrulen, rondachtige steentjes die al vroeg in de geschiedenis van ons zonnestelsel werden gevormd en samenklonterden tot grotere lichamen en later tot de planeten van het binnenste zonnestelsel, waaronder de aarde. Koolstofchondrieten bevatten zowel water als organische moleculen, die uiteindelijk in onze atmosfeer, onze oceanen en het leven op aarde terechtkwamen. Het blokje rechts is 1 cm in het vierkant. *Matteo Chinellato (via Wiki, Creative Commons)*

asteroïden die in onze tijd tussen de banen van Mars en Jupiter worden aangetroffen. Een andere hypothese is dat zich uit deeltjes met de omvang van ongeveer een kiezelsteen direct planeetachtige lichamen vormden. Hoe het ook zij, de accretie ging door totdat er niet meer dan ongeveer honderd protoplaneten over waren, in grootte variërend van de maan tot Mars. Uit de botsingen van die protoplaneten zijn de planeten van ons zonnestelsel ontstaan en één zo'n botsing zou van grote invloed zijn op onze thuisplaneet. Enkele

tientallen miljoenen jaren nadat de jonge aarde grotendeels was gevormd, werd die geramd door een planeet zo groot als Mars, waardoor gesteente en gas de ruimte in werden geslingerd. Een groot deel daarvan klonterde mettertijd samen tot een vrij kleine, rotsachtige bol, die in een permanente baan om de aarde terechtkwam. Een vollemaan mag dan inspireren tot poëzie, maar de maan werd met geweld geboren en haar geheimen zijn ontrafeld door nauwkeurige bestudering van maangesteente.

De aarde is een stenen bal met een doorsnee van 12.746 kilometer ter hoogte van de evenaar. (De aarde is trouwens niet helemaal rond: doordat ze draait is ze wat breder aan de evenaar en wat platter bij de polen.) Als u de aarde in tweeën zou snijden (wat geen goed idee is, zeg ik maar vast), zult u zien dat die niet homogeen is, maar een concentrisch gelaagd geheel, als een hardgekookt ei (figuur 3). Het 'eigee' is de kern, het hete, dichte binnenste dat ongeveer een derde van de aardmassa vertegenwoordigt. De kern bestaat voornamelijk uit ijzer, met wat nikkel en ongeveer 10 procent lichtere elementen, waarschijnlijk onder meer zuurstof, waterstof, zwavel en/of stikstof. We moeten daar 'waarschijnlijk' bij zetten want, met alle respect voor Jules Verne, niemand is ooit naar het binnenste van de aarde gereisd om monsters te nemen. Door aardbevingen veroorzaakte energiegolven werken ongeveer als een CT-scanner in het ziekenhuis, en hoe die golven zich in de aarde voortplanten, worden teruggekaatst, van richting veranderen of worden geabsorbeerd, geeft een beeld van de afmetingen en

de dichtheid van de kern. Gezien die dichtheid kan het niet anders dan dat de kern bijna, maar niet helemaal uit ijzer bestaat. Uit laboratoriumexperimenten en berekeningen blijkt dat de kern een bepaalde hoeveelheid lichtere elementen moet bevatten, zoals de bovenstaande. Maar uiteindelijk weten we niet precies wat de samenstelling is, want er zijn verschillende mogelijkheden, die geen van alle een sluitende verklaring bieden. De binnenste kern (een bal van 1226 kilometer doorsnee) is vast, maar de buitenste kern (van ongeveer 2260 kilometer dik) is vloeibaar en beweegt langzaam door convectie, waarbij het dieperliggende, warmere en dichtere materiaal opstijgt en het koudere, minder dichte materiaal bij het oppervlak zinkt. Die beweging van de buitenste kern werkt als een dynamo, die verantwoordelijk is voor het magnetisch veld rond de aarde. Nu denkt u misschien niet dagelijks aan dat magnetisch veld, maar u zou dankbaar moeten zijn dat het bestaat, want het voorkomt dat onze atmosfeer wordt weggeblazen door de zonewind (een stroom van elektrisch geladen deeltjes die vanaf de zon op ons af komt). Ook wijst een kompasnaald door het magnetisch veld (ongeveer) naar het noorden.

De kern wordt omringd door de aardmantel: het wit van ons planetaire ei. De mantel vertegenwoordigt ongeveer twee derde van de aardmassa en bestaat voornamelijk uit silicaten (mineralen rijk aan siliciumdioxide (SiO_2 , kwarts in zijn puur kristallijne vorm)), magnesium en kleinere hoeveelheden ijzer, calcium en aluminium. Ook onze kennis over de aardmantel komt vooral van de schokgolven van aardbevingen, aangevuld met laboratoriumexperimenten. Af en toe bewijst de aarde ons

een dienst door stukjes mantel naar de oppervlakte te brengen. Met name diamanten zijn belangrijke boodschappers uit de diepte. Deze zeer harde klompen pure koolstof worden 160 of meer kilometer onder het aardoppervlak gevormd en worden door magma, de vloeibare voorloper van lava en stollingsgesteente, naar boven gebracht. Lorelei Lee hield vol dat diamanten '*a girl's best friend*' waren, maar ook geologen zijn er gek op, want diamanten bevatten vaak kleine stukjes mantelmateriaal die in het laboratorium kunnen worden bestudeerd.

De mantel is vast, maar op de zeer lange duur is er wel sprake van convectie. Hoe het driedimensionale patroon van de circulatie in de mantel er precies uitziet is nog onderwerp van debat, evenals de vraag of de mantel overal vulkanisch gesteente produceert dat naar het oppervlak wordt gebracht. Geologen zijn het er echter wel over eens dat de best toegankelijke laag van de aarde, de korst, is ontstaan door het gedeeltelijk smelten van mantelgesteente.

De aardkorst (de dunne schaal in de analogie van het ei) vormt minder dan 1 procent van de aardmassa, maar is de enige laag die we zonder veel moeite van dichtbij kunnen bestuderen. Het is een opmerkelijke schatkist aan wetenswaardigheden. De continenten zijn gemaakt van korst die kwarts bevat (SiO_2) en kalium- of natriumrijke veldspaatmineralen. Voorbeelden zijn te zien in de White Mountains in New Hampshire en in Californië, in de steile kliffen van het Yosemite National Park in de Sierra Nevada. De korst onder de oceanen is anders. Die bestaat uit basaltgesteente, zoals dat door de vulkanen op Hawaï wordt uitgebraakt. Het bevat calcium- en natriumrijke

veldspaatmineralen, maar geen kwarts. De continentale korst is dikker en minder dicht en drijft daardoor hoger dan de oceaankorst, zoals ijsklontjes in een koud drankje. Het komt doordat water zich ophoopt in de laagste delen van de aarde dat de basaltkorst voor het grootste deel onder zee ligt.

Hoe zijn die lagen in de aarde tot stand gekomen? Je zou kunnen denken dat in die concentrische lagen de verschillende accretiefasen tijdens het ontstaan van de aarde tot uiting komen. Maar dat gaat in tegen veel natuurkundige en scheikundige kennis die we inmiddels hebben opgedaan. De meeste wetenschappers zijn het erover eens dat toen de jonge aarde groter werd, ze door de warmte van de voortdurende botsingen en het verval van radioactieve isotopen smolt.

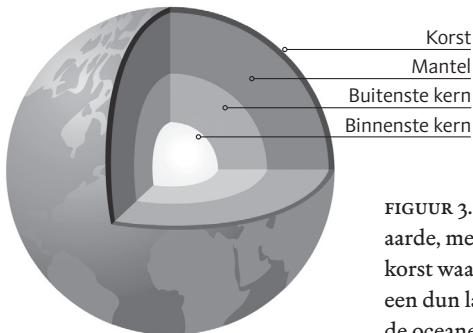
ELEMENTEN, ISOTOPEN EN CHEMISCHE
VERBINDINGEN

De elementen zijn de bouwstenen van chemische verbindingen. De eigenschappen van de elementen worden bepaald door het aantal protonen en elektronen. Koolstof hecht zich bijvoorbeeld in bepaalde patronen aan andere elementen omdat het zes protonen en zes elektronen heeft. Het periodiek systeem der elementen, dat in scheikundelokalen overal ter wereld een prominente plaats inneemt, geeft een systematisch overzicht van de

protonen en elektronen van de 118 bekende elementen en de chemische verbindingen die ze kunnen aangaan, en dus van hun voorkomen in de natuur.

Alle koolstofatomen hebben zes protonen en zes elektronen, maar het aantal protonen kan variëren. De meeste koolstofatomen, ongeveer 99 procent van het totaal, zijn koolstof-12, met zes protonen en zes neutronen, samen een atoomgewicht van 12 (waarbij het gewicht van een waterstofatoom 1 is). Ongeveer 1 procent van de koolstofatomen heeft een extra neutron, en dus een atoomgewicht van 13, en in elke biljard koolstofatomen zitten er daarnaast nog een paar met acht neutronen, en een atoomgewicht van 14. Koolstof-14 is de lezer misschien bekend omdat het een zeer handige eigenschap heeft: het is radioactief. Radioactieve isotopen zijn instabiel: in de loop van de tijd vervallen ze tot de stabielere dochteratomen. Koolstof-14 vervalt spontaan tot stikstof-14. In het laboratorium kunnen we dit verval meten: in een periode van 5730 jaar (de zogenoemde halveringstijd) vervalt de helft van de koolstof-14 in een monster tot stikstof. Daardoor is koolstof-14 een waardevolle dateringsmethode bij archeologisch onderzoek. Na enkele tienduizenden jaren is er in een monster echter zo weinig koolstof-14 over dat dit niet goed meer gemeten kan worden, en dus moeten we, om meer te weten te komen over de oudste geschiedenis van de aarde, isotopen met een langere halveringstijd gebruiken, zoals uranium.

Hoewel het aantal protonen en elektronen de identiteit van een element bepalen, en daardoor de chemische reacties die het kan aangaan, wordt de snelheid waarmee die reacties plaatsvinden bepaald door het gewicht van de isotopen. Radioactieve isotopen van verschillende elementen kunnen dus als gereedschap dienen om de geschiedenis van de aarde vast te stellen. Zoals we zullen zien, zijn het die eigenschappen van isotopen die ze onmisbaar maken voor het onderzoek naar de geschiedenis van de aarde en het leven.



FIGUUR 3. Een doorsnede van de aarde, met de interne lagen. De korst waarop we lopen is maar een dun laagje; de atmosfeer en de oceanen zijn nog dunner. Macrovector/adobe.stock.com

Zwaardere elementen, met name ijzer, zonken naar het binnenste van de aarde, terwijl mineralen als magnesiumsilicaat en andere combinaties van silica met ijzer, aluminium, calcium, natrium en kalium een buitenste laag vormden. Zo ontstond de concentrische structuur van kern en mantel. De

buitenste korst volgde spoedig daarna (figuur 3).

Hoe is de aardkorst ontstaan? Om die vraag te beantwoorden moeten we terug naar een eerdergenoemd punt: verschillende mineralen smelten of kristalliseren bij verschillende temperaturen. Gedurende een paar miljoen jaar nadat de aarde zich had gevormd, rees er vanuit de mantel gesmolten materiaal op, dat zich over het hele aardoppervlak verspreidde. Zo ontstond wat planetologen de magmaocean noemen. Als je wel eens verse lava hebt zien stromen, bijvoorbeeld uit de Kilauea, de actiefste vulkaan van Hawaï, heb je een idee hoe dat eruit moet hebben gezien: een zwarte woestijn, waar uit barsten en verse, gloeiende lavastromen een oranje schijnsel oplicht, bedekt door een deken van kolkende stoom.

Doordat de warmte weglekte naar de atmosfeer, koelde de magmaocean af tot een oerkorst, die voornamelijk bestond uit basalt. En naarmate die korst dikker werd en aan de onderkant weer begon te smelten, vormde zich silicaatrijk gesteente dat meer leek op graniet: de eerste continentale korst. Die eerste ontwikkeling van de korst vinden we in het bodemarchief terug in kleine stukjes mineraal die we zirkonen noemen. Het mineraal zirkoon (zirkoniumsilicaat, $ZrSiO_4$) ontstaat als magma kristalliseert tot silicaatrijk stollingsgesteente. Zirkonen hebben een opmerkelijke eigenschap die hen van waarde maakt voor geologen. Tijdens het kristallisatieproces nemen ze een beetje uranium op in hun structuur. Ze nemen dan geen lood op, want loodionen zijn te groot en passen niet tussen de kristallen. Waarom is dat van belang?

Sommige uraniumionen zijn radioactief: uranium-235 en uranium-238 vervallen tot respectievelijk lood-207 en lood-206 met een snelheid die in het laboratorium kan worden gemeten. Uranium-238 heeft een halveringstijd van 4,47 miljard jaar, wat betekent dat in die periode de helft van het uranium-238 in een bepaald stukje zirkoon zal zijn vervallen tot lood-206. Uranium-235 heeft een halveringstijd van 710 miljoen jaar. Omdat de zirkonen geen lood bevatten bij hun ontstaan, moet het aangetroffen lood wel afkomstig zijn van het radioactieve verval van het uranium. Dus als we het lood en het uranium in zirkonen nauwkeurig meten, krijgen we een soort klok: de beste chronometer die we hebben voor de lange geschiedenis van onze planeet.

Zirkonen kunnen ons helpen bij het bepalen van de geologische tijd, dat is mooi. Maar we hebben geen gesteente dat ouder is dan vier miljard jaar. Hoe kunnen die zirkonen dan licht werpen op de vroegste aardgeschiedenis? Voor een antwoord op die vraag moeten we naar de kust. Aan het favoriete strand van mijn ouders, de North Shore in Massachusetts, was het zand waar we kastelen mee bouwden ontstaan door de erosie van oeroud hoogland, waarvan de resten zichtbaar zijn in de White Mountains in New Hampshire en andere bergketens die de ruggengraat van New England vormen. Daar komt graniet aan de oppervlakte dat ontstond tijdens de vorming van deze gebergten, 400 miljoen jaar geleden. We kunnen hun ontstaan zo precies dateren omdat ze zirkonen bevatten. Zirkonen uit die bergen zijn in de loop van de tijd geërodeerd en via rivierwater aan de kust terechtgekomen, en daar liggen

ze (voorlopig) als zandkorrels op de stranden van Massachusetts. De stranden zelf zijn dus nog vrij jong, maar ze bestaan uit veel oudere zandkorrels, waaronder zirkonen van 400 miljoen jaar oud.

Dit principe helpt ons ook om de duistere begintijd van de aarde in beeld te krijgen. Bij de onooglijke Jack Hills-formatie, een paar verweerde, orangerode rotsen in West-Australië, komt zandsteen en grind aan de oppervlakte dat zo'n drie miljard jaar geleden door rivieren is afgezet. De leeftijd van het gesteente is op zich al interessant (sedimentair gesteente dat zo oud is, komt maar weinig voor), maar het ware belang van de Jack Hills schuilt in de korrels die al die eonen geleden tot zandsteen zijn samengeklonterd. Daar zitten zirkonen bij, waarvan ongeveer 5 procent ouder is dan vier miljard jaar. De oudste 'klok' is 4,38 miljard jaar oud, bijna net zo oud als de aarde zelf. Gelijksoortige ontdekkingen zijn onlangs gedaan in Zuid-Afrika en India.

Wat kunnen we leren van die oeroude mineralen? Allereerst dat zirkonen niet in elk stollingsgesteente ontstaan. Ze komen vooral voor in silicarijke korstgesteenten die qua chemische samenstelling duiden op granietvorming. De zirkonen duiden er dus op dat de differentiatie van de aardkorst al vroeg in de aardgeschiedenis begon. De chemische samenstelling van de zuurstof in de zirkonen lijkt er ook op te duiden dat er 4,38 miljard jaar geleden al vloeibaar water was: de hydrosfeer van de aarde bestaat dus al bijna net zo lang als de planeet zelf. Sommige oude zirkonen bevatten voorts minieme hoeveelheden andere mineralen waaruit we

de eigenschappen van het binnenste van de aarde meer dan vier miljard jaar geleden kunnen afleiden. Misschien wel het interessantst – en het meest controversieel – zijn kleine deeltjes grafiet, pure koolstof dus, in een zirkoon van 4,1 miljard jaar oud. Zou dit een aanwijzing kunnen zijn dat er toen al leven was? Daarop komen we terug in hoofdstuk 3. Laten we nu eerst het portret van onze jonge planeet goed bekijken, dat langzaam gestalte krijgt.

We weten nu waaruit de aarde in hoofdzaak bestaat. Maar hoe zit het met de noodzakelijke voorwaarden voor het leven, het water in de oceanen en het gas in de atmosfeer? Lang hebben planetologen gedacht dat het water en de lucht in de latere ontwikkelingsstadia van de aarde zijn toegevoegd, als een dun laagje vernis, en zijn meegekomen met ingeslagen kometen. Kometen, ook wel aangeduid als ‘vieze sneeuwballen’, zijn boodschappers uit de buitengewesten van het vroege zonnestelsel en bestaan voornamelijk uit ijs, aangevuld met kleine hoeveelheden rotsachtig materiaal. Door recente ontwikkelingen in onze kennis van de chemische samenstelling van kometen kunnen we de hypothese dat water en lucht van kometen afkomstig zouden zijn nu toetsen, en wel met behulp van waterstofisotopen. We kennen de verhouding tussen waterstof en deuterium in water en andere waterstofhoudende substanties op aarde vrij goed (met deuterium hebben we al kennism gemaakt: een waterstofisotoop met een proton, een elektron én een neutron). Daarom zou een plausibele bron van waterstof op aarde (vrijwel) diezelfde verhouding

waterstof/deuterium moeten hebben. Kometen voldoen helaas niet aan die voorwaarde: uit hun chemische samenstelling blijkt dat ze voor niet meer dan 10 procent van het water op aarde verantwoordelijk kunnen zijn.

De rest van het water, en dat geldt ook voor de gassen in de atmosfeer en de koolstof in ons lichaam, kwam mee met sommige van de meteorieten waaruit de aarde is opgebouwd, in het bijzonder met een aantal chondrieten die waarschijnlijk tijdens de laatste stadia van de aardgroei insloegen. Een bepaalde groep chondrieten, de koolstofchondrieten, verdienen speciale aandacht, want 3 tot 11 procent van hun massa bestaat uit water, grotendeels gebonden aan kleine hoeveelheden klei en andere mineralen, naast 2 procent organische stof (koolwaterstofmoleculen), waaronder aminozuren zoals we die ook in eiwitten vinden. Chondrieten vormden dus een bron van water- en koolstof, en in tegenstelling tot kometen komen ze wél door de waterstofisotopentest. Het ziet er dus naar uit dat onze planeet haar gesteenten, water en lucht te danken heeft aan verschillende soorten chondrieten.

Op de vroege aarde werd door de hitte uit het binnenste van de planeet waterdamp, stikstofgas en kooldioxide naar buiten geperst, zodat een hete, dichte atmosfeer ontstond, misschien wel honderd keer dichter dan de huidige. Toen de aarde afkoelde, condenseerde het grootste deel van de waterdamp, en dat water regende neer op het oppervlak en vormde daar de oceanen. Tegelijkertijd reageerde een deel van de kooldioxide in de atmosfeer met het gesteente en het water, en vormde zo kalksteen, dat als sediment weer op de bodem

neersloeg. Misschien leek deze aarde nog wel het meest op Hawaï, met zijn door wolken omgeven, uit de zee priemende vulkanen. Het moet er vreemd hebben uitgezien, want volgens sommige wetenschappers lag over de dikke, nevelige atmosfeer een rossige gloed, die werd veroorzaakt door kleine organische moleculen, het product van door straling uitgelokte chemische reacties.

De ontgassing is nooit helemaal voltooid: er zit nog steeds meer water in de mantel dan in de oceanen. En de beweging van het water van de mantel naar het oppervlak was ook geen eenrichtingsverkeer. Er is reden om aan te nemen dat de hete mantel van de jonge aarde minder water kon bevatten dan de huidige. De eerste oceanen waren daarom misschien groter dan die van nu. Eén ding is zeker: deze eerste atmosfeer bevatte nog geen zuurstofgas. Zoals we in hoofdstuk 4 zullen zien, kwam de zuurstof waar wij van leven pas later, en ontstond die niet door puur chemische, maar door biologische processen.

Mettertijd nam het aantal grote inslagen af, en de aarde koelde af en differentieerde. Er slaat nog steeds wel eens een meteoriet in. Een klein exemplaar raakte bijvoorbeeld in 1992 een auto in het stadje Peekskill in de staat New York, en de bezoekers van de indrukwekkende Meteor Crater bij Flagstaff in Arizona zien een gat van meer dan een kilometer doorsnee, het gevolg van een inslag 50.000 jaar geleden. De frequentie van de inslagen en het formaat van de meteorieten zijn echter gaandeweg afgenomen. Op de jonge aarde kwamen af en toe nog inslagen voor die oceanen konden laten verdampen. Bewijs hiervoor komt niet van onze eigen planeet, maar van

onze buurplaneet, Mars. In de zuidelijke hooglanden daar is nog een heel oud, met kraters bezaaid oppervlak bewaard gebleven. Er zitten een paar reusachtige bij: een opvallend groot inslagbekken is Hellas Planitia gedoopt en is zo'n 2300 kilometer in doorsnee, ongeveer de afstand van Amsterdam tot Moskou. In vergelijking met de energie die bij zo'n inslag vrij zou komen zijn atoombommen niet meer dan rotjes.

Wanneer de inslagen precies in aantal en kracht begonnen af te nemen en hoe snel, blijft onderwerp van felle discussie. Een populaire hypothese sinds de mens op de maan is geweest is het 'Late Heavy Bombardment', een periode rond 3,9 miljard jaar geleden waarin het binnenste zonnestelsel het bijzonder zwaar te verduren kreeg. Het empirische bewijs hiervoor komt voor het grootste deel van gesteentemonsters die door astronauten op verschillende plaatsen op het maanoppervlak zijn verzameld. Tot verbazing van de wetenschappers bleek uit veel monsters dat er rond 3,9 miljard jaar geleden zware inslagen waren geweest. Dit werd aanvankelijk geïnterpreteerd als niet meer dan een piek in het aantal inslagen, op grond van modellen waarbij de banen van Saturnus of Jupiter verschoven, waardoor er meer materiaal vanuit het buitenste zonnestelsel binnendrong. Sommige planetologen geven de voorkeur aan een andere interpretatie en stellen dat de vele aanwijzingen voor inslagen op de maan, 3,9 miljard jaar geleden, het resultaat zijn van één ingrijpende gebeurtenis, niet van een ruimtevloot van losse meteoren. Anderen menen dat de waargenomen piek in die periode een artefact is en er eigenlijk sprake is van een dalend aantal inslagen door de tijd

heen. Nieuwe modellen van de dynamiek in ons zonnestelsel ondersteunen het idee van een bombardement, maar lijken erop te wijzen dat het veel eerder plaatsvond. Op dit moment denken veel wetenschappers dat er op aarde al zo'n 4,2 tot 4,3 miljard jaar geleden geen gevaar meer bestond voor inslagen van het formaat dat een oceaan kon laten verdampen.

Heel het bijzondere spektakel van het ontstaan van de aard – de samenklontering van oeroud sterrenstof, de smelt en de differentiatie die het binnenste van de aarde vormden, het ontstaan van oceanen en de atmosfeer – het speelde zich allemaal af in niet meer dan 100 miljoen jaar. Tegen 4,4 miljard jaar geleden had de aarde een herkenbare vorm: een met water bedekte, rotsachtige planeet onder een dun laagje lucht. Er waren al continenten, maar ze waren klein en lagen misschien grotendeels onder zee. Ik stel me de jonge aarde voor als een soort mondiaal Indonesië, met bogen van boven zee uitstekende vulkanen en alleen sporadisch grotere landmassa's. De aarde was gewikkeld in een dikke deken, maar deze atmosfeer bevatte geen zuurstof: een menselijke tijdreiziger zou het er niet lang volhouden. Dus ondanks een aantal vertrouwde kenmerken was het nog niet onze planeet. De wereld die we kennen, met grote continenten, lucht die je kunt ademen, en met leven, die was er nog niet.

