

Inhoud

Voorwoord	7
1. Het kwartet van Aristoteles de elementen in de oudheid	9
2. Revolutie hoe zuurstof de wereld veranderde	31
3. Goud het glorieuze en vervloekte element	52
4. De achtvoudige aanpak het ordenen van de elementen	80
5. De atoomfabrieken nieuwe elementen maken	108
6. Chemische broers en zussen waarom isotopen nuttig zijn	139
7. Voor alle praktische doeleinden technologie van de elementen	162
Noten	183
Lijst van afbeeldingen	187
Meer lezen	189
Index	190

Voorwoord

Toen mij werd gevraagd om een inleiding tot de elementen te schrijven bij mijn boek *Stories of the Invisible*, dat zelf een inleiding op moleculen is, had ik gemengde gevoelens. Per slot van rekening had ik in dat eerdere boek niet zo veel respect getoond voor het Periodiek Systeem, dat fameuze portret van alle bekende chemische elementen. Om preciezer te zijn, ik had beweerd dat chemici niet langer het idee koesteren dat alle chemie zijn oorsprong heeft in het Periodiek Systeem. Voor de basiskennis van de moleculaire wetenschappen heb je immers genoeg aan een zeer beperkte selectie uit de meer dan honderd elementen van het systeem. Er is geen pianoleraar die beginnende leerlingen ooit alle noten van het hele klavier zou laten bespelen. Het is veel beter te laten zien hoe een paar toetsen al genoeg zijn voor een heel scala aan melodieën. Zoals het bij muziek gaat om melodieën, akkoorden en harmonieën, niet om noten *op zich*, zo gaat het bij chemie om stoffen en moleculen, niet om elementen.

Maar wie in hart en nieren chemicus is kan de elementen niet weerstaan, en dat is bij mij ook zo. Het gold ook voor Oliver Sacks, die als jongen een verzameling elementen aanlegde terwijl de meeste andere jongens postzegels of munten verzamelden. Hij wilde ze allemaal in zijn bezit hebben. In de veertiger jaren van de vorige eeuw was het niet eens zo lastig om zo'n verzameling op te bouwen: Sacks kon naar Griffin & Tatlock gaan, ten noorden van Londen, om zijn zakgeld te besteden aan een brok natrium, dat hij vervolgens sissend en sputterend over het wateroppervlak van Highgate Ponds liet gaan, niet ver van zijn huis. Jaloersmakend is dat; ik moest me zelf beperken tot het smokkelen van brokjes zwavel en flesjes kwik uit het schoollaboratorium.

De elementen waren als zeldzame edelstenen of het lekkerste suikergoed. Ik wilde ze ruiken en aanraken, maar was

voorzichtig genoeg om ze niet te willen proeven. De lijfelijke, sensuele ervaring werd nog sterker door de wetenschap dat deze stoffen puur waren, onvermengd, niet te vereenvoudigen. Het was het oerspul van de schepping dat ik in mijn hand hield.

Ik wist dus dat ik niet aan de verleiding zou kunnen weerstaan om over de elementen te mogen schrijven. Maar ik begon ook in te zien dat een inleiding op de elementen niet persé een rondleiding door het héle Periodiek Systeem zou hoeven zijn – dat hadden andere per slot van rekening al veel vakkundiger en uitputtender gedaan dan ik ooit voor mijn rekening zou kunnen nemen. Het verhaal van de elementen is het verhaal van onze relatie met de materie, iets dat vér voorafgaat aan welke notie van een Periodiek Systeem dan ook. Vertrouwdheid met materie is geen kwestie van detailkennis over silicium, fosfor en molybdeen; het volgt uit de plezierige zwaarte van een baar zilver, de koele zoetheid van water, de gladheid van gepolijst jade. Het is de bron van de fundamentele vraag: waar is de wereld van gemaakt?

In dit boek kom je daarom ‘elementen’ tegen die in geen enkel Periodiek Systeem te vinden zijn: water en lucht, zout, vernuftig flogiston. Het maakt niet uit dat de chemie ze inmiddels uit elkaar heeft gehaald of zelfs helemaal verbannen heeft; ze maken onderdeel uit van het erfgoed waartoe ook het Periodiek Systeem behoort en ze zijn onderdeel van ons repertoire aan culturele symbolen.

Ik ben bijzonder dankbaar voor het commentaar, advies en materiaal dat ik kreeg met betrekking tot de verschillende onderwerpen in dit boek, van Al Ghiorso, Darleane Hoffmann, Scott Lehman, Jens Nørskov en Jim White. Mijn dank gaat ook uit naar Shelley Cox voor haar enthousiasme en vertrouwen bij de opdracht voor dit boek.

Philip Ball

Londen, maart 2002

1. Het kwartet van Aristoteles

de elementen in de oudheid

In 1624 werd de Franse chemicus Étienne de Clave gearresteerd voor ketterij. Zijn ontoelaatbare ideeën hadden niets te maken met de interpretatie van de heilige schrift. Ze waren ook niet van politieke aard. Ze stelden niet eens de plaats van de mens in het heelal ter discussie, zoals Galilei zo brutaal deed.

De ketterij van Étienne de Clave betrof de elementen. Hij geloofde dat alle stoffen waren samengesteld uit twee elementen – water en aarde – en ‘mixts’ daarvan met drie andere fundamentele substanties of ‘principles’: kwik, zwavel en zout. Het was geen nieuw idee: de grote Franse apotheker Jean Béguin, die in 1610 een van de eerste leerboeken in de chemie had uitgegeven, *Tyrocinium chymicum* (*De Chemische Beginner*), had tot aan zijn dood een decennium later volgehouden dat alle materie in principe uit dezelfde vijf basisingrediënten bestond.

Maar een beroep op navolging kon Étienne de Clave niet helpen. Zijn idee was kettters omdat het in tegenspraak was met het systeem van elementen zoals dat was voorgesteld door de oude Grieken en de zegen had gekregen van Aristoteles, hun meest invloedrijke filosoof. Aristoteles nam het concept over van zijn leraar Plato, die het op zijn beurt van de filosoof Empedocles had, uit Athenes Gouden Tijdperk van Pericleaanse democratie, in de vijfde eeuw voor Christus. Volgens Empedocles waren er vier elementen: aarde, lucht, vuur en water.

Het Middeleeuwse Westen, dat door de schok van de val van Rome in culturele onzekerheid was geraakt, ontworstelde zich aan het trauma van de Donkere Eeuwen met een verering van de wijsgeren uit de oudheid, vermengd met de doctrines van het Christendom. Het woord van Aristoteles raakte

doordrongen van de autoriteit van God, en eraan te twijfelen stond zo ongeveer gelijk aan godslastering. Het duurde tot aan het eind van de zeventiende eeuw tot de ontdekkingen van Galileo, Newton en Descartes de Westerse wereld in staat stelden voor zichzelf te bedenken hoe het heelal in elkaar zat.

Precies daarom maakte in augustus 1624 een parlementair bevel een eind aan het plan van Étienne de Clave en een handjevol andere Franse intellectuelen om in het huis van de Franse edelman François de Soucy over een niet-Aristotelische theorie van de elementen te gaan discussiëren. De oproerkraaijer werd gearresteerd.

De controverse ging eigenlijk helemaal niet over wetenschap. Dat de autoriteiten de wet toepasten dwang gebruikten ter verdediging van een theorie was niet omdat ze zich zo om de aard van de elementen bekommerden, maar vooral omdat ze de status quo wilden handhaven. Net zoals bij Galileo's proces voor de Inquisitie stond hier niet de 'waarheid' ter discussie, maar betrof het een strijd om de macht, een kenmerk van het religieuze dogmatisme van de contrareformatie.

Ongehinderd door dergelijke beperkingen waren de oude Grieken veel vrijer in hun discussies over de elementen. Het kwartet van Aristoteles was voorafgegaan door – en bestond in feit naast – allerlei andere elementaire indelingen. In de zestiende eeuw liet de Zwitserse geleerde Conrad Gesner zien dat er niet minder dan acht elementen-systemen waren voorgesteld in de periode tussen Thales (aan het begin van de zesde eeuw voor Christus) en Empedocles. In weerwil van de Condemnatie van 1624 maakte dit het moeilijker om een bijzondere status toe te kennen aan het kwartet van Aristoteles, en hielp het opnieuw de vraag op te werpen waarvan dingen eigenlijk gemaakt zijn.

Waar zijn de dingen van gemaakt? Dit is een kort boek, maar het antwoord valt nog veel beknopter te geven. Het *Periodiek Systeem der Elementen* bevat alle bekende elementen, en het is – afgezien van een langzaam groeiende rij van door

de mens gemaakte elementen – allesomvattend. Dit is het antwoord. Dit zijn de elementen: niet een, geen vier, geen vijf, maar zo'n tweeënnegentig exemplaren die in de natuur voorkomen.

Waar zijn de dingen van gemaakt? Hoewel het Periodiek Systeem een van de hoogtepunten is van de wetenschap, doet het die vraag niet helemaal recht. Ga even voorbij aan het feit dat er meer subtiele variatie is onder de atomaire bouwstenen dan de tabel impliceert (zoals we later zullen zien). Vergeet even dat deze atomen uiteindelijk toch niet fundamenteel en onveranderlijk zijn, maar zelf weer uit andere entiteiten bestaan. Laten we ons er geen zorgen over maken dat de meeste mensen van veel van deze elementen nog nooit gehoord hebben, laat staan dat ze een idee hebben hoe ze er uit zien en zich gedragen. En laten anderen maar discussiëren over het feit dat de atomen van de elementen vaker wel dan niet met elkaar verbonden zijn tot moleculen waarvan de eigenschappen zich niet makkelijk laten afleiden van de aarde van de elementen zelf. Zelfs dan kun je niet op basis van het Periodiek Systeem stellen dat Aristoteles het helemaal bij het verkeerde eind had – en met hem iedereen tot aan het eind van de achttiende eeuw. Door ons dingen af te vragen over de elementen krijgen we zicht op de aard van de materie. Niet alleen door de antwoorden van vandaag – de juiste – maar ook door de manier waarop in andere tijden over zulke vragen werd nagedacht. Daarbij hebben we meer aan een verkenning van die zoektocht, dan aan de lijst die er het resultaat van is.

Waar zijn de dingen van gemaakt? We zijn een maatschappij geobsedeerd door vragen over samenstelling, en niet zomaar. Lood uit benzine duikt op in Antarctica, kwik vergiftigt vissen in Zuid-Amerika. Radon uit de aarde brengt gezondheidsrisico's met zich mee voor gebieden die op graniet zijn gebouwd, en natuurlijk arsenicum vergiftigt bronnen in Bangladesh. Calciumsupplementen bestrijden ziekten die bot aantasten; ijzer vermindert anemie. Er zijn elementen

waar we gek op zijn, en elementen waar we ons beter niet mee kunnen inlaten.

Zo op het eerste gezicht is de wereld om ons heen niet echt rijk aan elementen. Er zijn er vier die we op allerlei manieren in de moleculen van ons lichaam tegenkomen: koolstof, stikstof, zuurstof en waterstof. Fosfor is onmisbaar, niet alleen voor ons bot maar ook voor de DNA moleculen die het leven in al zijn verschijningsvormen registreren. Zwavel vormt een belangrijk onderdeel van eiwitten; het helpt hen om hun complexe vorm vast te houden. Toch is er naast deze sleutelspelers nog een hele reeks anderen waar het leven niet zonder kan. Veel zijn metalen: ijzer maakt ons bloed rood en helpt het om zuurstof naar onze cellen te transporteren; magnesium zorgt ervoor dat chlorofyl de energie van de zon kan vangen aan de basis van de voedselpyramide; natrium en kalium verzorgen de elektrische prikkels in onze zenuwen. Van alle in de natuur voorkomende elementen liggen er elf aan het leven ten grondslag en zo'n vijftien anderen zijn essentiële sporenelementen die vrijwel alle levende organismen in kleine hoeveelheden nodig hebben. (Daaronder ook 'giftig' arseen en 'steriel' broom, wat duidelijk maakt dat er geen duidelijke indeling is te maken van 'goede' en 'slechte' elementen.)

De ongelijke verdeling van elementen over het aardoppervlak heeft de geschiedenis gevormd – via het stimuleren van handel en het aanmoedigen van exploratie en culturele uitwisseling – maar het heeft ook geleid tot uitbuiting, oorlog en imperialisme. Zuid-Afrika heeft een hoge prijs betaald voor zijn goud, en voor het elementaire koolstof van zijn diamanten. Veel zeldzame, maar technologisch gezien belangrijke elementen, zoals tantaal en uranium, worden nog steeds gedolven in arme delen van de wereld, onder omstandigheden (en vanwege motieven) die als verderfelijk en gevaarlijk zijn te beschouwen.

Halverwege de twintigste eeuw waren alle natuurlijk voorkomende stabiele elementen bekend, en experimenten met

kernenergie brachten toen een heel pantheon van zwaardere, kortlevende radioactieve elementen aan het licht. Pas met de beschikbaarheid van nieuwe, ultragevoelige chemische analysetechnieken is ons de complexiteit duidelijk geworden van de manier waarop elementen in de wereld vermengd zijn, als exquise kruiden in de oceanen en de lucht.

Op een fles mineraalwater vinden we nu de gehalten van natrium, kalium, chloor en nog veel meer – waarmee het feit dat we eigenlijk gewoon H_2O drinken op de achtergrond raakt. We weten dat elementen labiele dingen kunnen zijn, zodat we geen loden waterleidingen en loodhoudende verf meer produceren en zodat aluminium (terecht of onterecht) in het beklagdenbankje staat voor het veroorzaken van dementie. De reputatie van de elementen wordt nog steeds gevormd door zowel overlevering en folklore als door daadwerkelijk begrip van hun kwantitatieve effecten. Zou aluminium dan wél goed zijn in de minerale optische witmakers in waspoeders, maar slecht in potten en pannen? Zo kunnen koperzouten giftig zijn, maar wordt gedacht dat koperen armbanden artritis kunnen genezen. We nemen selenium voedingssupplementen om vruchtbaarheid te stimuleren, terwijl het als verontreiniging in het oppervlaktewater hele Californische ecosystemen verwoest. Wie kan zeggen of 0,01 milligram kalium in fleswater te weinig of te veel is?

De terminologie van de elementen sluipt onze taal binnen, soms gescheiden van de kwestie waar het oorspronkelijk aan refereerde. Zo zit er geen lood in een potlood en betekent ‘cadmiumrood’ ter aanduiding van een verfkleur waarschijnlijk niet dat er daadwerkelijk cadmium in zit. De Amerikaanse stuiver heet ‘nickel’ maar er zit relatief weinig nikkel in. En wanneer zou de laatste keer zijn geweest dat het rinkelende ‘argent’ in de vestzak van een Fransman daadwerkelijk uit zilver was gemaakt?

Dit zijn redenen waarom het verhaal van de elementen niet zomaar het relaas is van een stuk of honderd verschillende

soorten atomen, elk met zijn bijzondere eigenschappen en eigenaardigheden. Het is het verhaal van onze culturele interacties met de aard en samenstelling van materie. De Whigse opvatting van de chemische geschiedenis, als een soort voortschrijdende opheldering en indeling van de bouwstenen van de materie, verhult een diepere zoektocht naar de samenstelling van de wereld, en de veranderlijkheid van die samenstelling door menselijk of natuurlijk handelen.

Stukjes van de puzzel

Het concept van elementen is innig verstrengeld met het idee van atomen, maar beiden kunnen zonder de ander bestaan. Plato geloofde in de vier canonieke elementen van de oudheid, maar hij was het niet eens met de notie van atomen. Andere Griekse filosofen vertrouwden op atomen maar deelden niet alle materie op in een handvol basis-ingrediënten.

Thales van Milete (ca. 620-555 v.Chr.), een van de eerst bekende onderzoekers van de samenstelling van de fysieke wereld, poneerde slechts één fundamentele substantie: water. In mythes is meer dan genoeg rechtvaardiging voor deze zienswijze te vinden; de Hebreeuwse god was niet de enige die de wereld schiep uit een oer-oceaan. Maar de Milesische filosofenschool van Thales wist nauwelijks consensus te bereiken over de *prote hyle*, de 'eerste materie' waaruit alles zou zijn opgebouwd. Thales' opvolger Anaximander (ca. 611-547 v.Chr.) vermeed de kwestie met zijn bewering dat dingen uiteindelijk zijn gemaakt van *apeiron*, de 'onbepaalde' en onkenbare eerste substantie. Anaximenes († ca. 500 v.Chr.) besloot dat lucht primair was, niet water. Voor Heraclitus († 460 v.Chr.) was vuur het materiaal van de oorsprong.

Waarom zou iemand überhaupt in een *prote hyle* geloven – of, wat dat betreft, in wat voor een soort achterliggende elementaire indeling dan ook? Waarom niet eenvoudigweg geconcludeerd dat steen steen is, en hout hout? Metaal, vlees, bot, gras ... er waren allerlei verschillende stoffen in de oude

wereld. Waarom werden deze niet geaccepteerd zoals ze waren, in plaats van als manifestaties van iets anders?

Sommige wetenschapshistorici betogen dat deze oude geleerden op zoek waren naar eenheid; dat ze de veelsoortige wereld wilden terugbrengen tot een eenvoudiger en minder verwarrend systeem. Die voorliefde voor 'eerste beginselen' is duidelijk aanwezig in de Griekse filosofie, maar er is ook een meer praktische reden om zoek te gaan naar fundamentele elementen: dingen veranderen. Water bevriest, of verdwijnt bij het koken. Hout brandt, waarbij een zware boomstam verandert in lichte, onaanzienlijke as. Metalen smelten en voedsel wordt verteerd, waarbij het meeste op de een of andere manier in de maag 'verdwijnt'.

Als de ene stof is te transformeren in een andere, komt dat dan misschien omdat beiden verschillende verschijningsvormen zijn van dezelfde oorspronkelijke substantie? Het idee van de elementen ontstond niet omdat de filosofen op een soort antieke queeste waren naar de theorie van alles, zoals de natuurkundigen van vandaag. Het ontstond omdat ze de transformaties wilden begrijpen die ze dagelijks zagen gebeuren in de wereld om heen.

Anaximander geloofde dat veranderingen tot stand kwamen door toedoen van conflicterende tegengestelde eigenschappen: warm en koud, droog en nat. Ook toen Empedocles (ca. 490-430 v.Chr.) de vier elementen voorstelde die in de Westerse natuurfilosofie de overhand kregen, betoogde hij dat hun transformaties te maken hadden met conflict.

Empedocles voldoet niet helemaal aan het beeld van de sobere en waardige Griekse filosoof. Volgens de overlevering was hij een soort tovenaars en wonderdoener die de doden weer tot leven kon brengen. Naar verluidt kwam hij zelf aan zijn eind door in de vulkanische strot van de Etna te springen, ervan overtuigd dat hij een onsterfelijke god was. Geen wonder, misschien, dat hij veronderstelde dat door de werking van de kleurrijke beginselen Liefde en Haat de aarde, lucht,