

Ooit stierf er een gigantische ster. Nadat ze miljoenen jaren had gebrand, was de brandstof voor de kernfusie in haar binnenste op. De ster creëerde de energie die nodig was om te stralen door waterstofatomen te fuseren tot helium. De daarbij vrijkomende energie liet haar niet alleen stralen, maar bood ook de cruciale weerstand tegen ineenstorting door de eigen zwaartekracht. Toen het waterstof op begon te raken, was de ster helium gaan fuseren tot atomen van zwaardere elementen, zoals koolstof en zuurstof. Maar dat betekende dat de stoffen die de ster nog kon verbranden, uitgeput raakten.

De dag kwam dat alle brandstof op was. De zwaartekracht won de strijd: de ster implodeerde. Na miljoenen jaren gebrand te hebben, kwam het einde in een oogwenk. En de ineenstorting veroorzaakte zo'n enorme explosie dat het heelal erdoor verlicht werd – een supernova. Als er ergens in het planetenstelsel van de ster leven zou zijn geweest, was dat allemaal vernietigd. Maar in de hitte van het stervensproces werden ook de zaden van iets nieuws geboren. De nog zwaardere chemische elementen die pal voor de dood van de ster gevormd waren – silicium, nikkel, zwavel en nikkel – werden ver het heelal in geslingerd.

Miljoenen jaren later passeerde de zwaartekrachtgolf van de supernova-explosie een wolk van gas, stof en ijs. Door het uitrekken en inkrimpen van de zwaartekrachtgolf werd de

wolk in elkaar gedrukt. Terwijl ze ingedrukt werd, begon ze te draaien. En door de zwaartekracht werd de druk op het gas in het binnenste van de wolk zo groot dat de atomen fuseerden. Waterstofatomen fuseerden onder druk tot helium, waarbij licht en hitte vrijkwamen. De cirkel in de sterrenwereld was rond. Uit het stervensproces van een oude ster was een andere, geheel nieuwe ster voortgekomen – onze zon.



De wolk van gas, stof en ijs werd verrijkt met elementen die bij de supernova waren ontstaan. Draaiende rond de zon stolden die elementen tot een stelsel van planeten. Eentje daarvan was de aarde. De gloednieuwe planeet aarde was heel anders dan de aarde die we nu kennen. Wij zouden geen adem kunnen halen in de dampkring die bestond uit methaan, koolstofdioxide, waterdamp en zuurstof. Het aardoppervlak was één grote oceaan van gesmolten lava, die voortdurend kolkte door de inslagen van asteroïden, kometen en zelfs andere planeten. Een daarvan was Theia, een planeet ongeveer zo groot als Mars nu.<sup>1</sup> Theia kwam met een flinke klap tegen de aarde aan en viel uit elkaar en een groot deel van het aardoppervlak werd door de botsing de ruimte in geslingerd. Een paar miljoen jaar lang had onze planeet ringen, net als Saturnus. Uiteindelijk trokken de ringen samen tot een nieuwe wereld – de maan.<sup>2</sup> Dit alles gebeurde ongeveer 4.600.000.000 (4,6 miljard) jaar geleden.

Er gingen nog eens miljoenen jaren voorbij. De tijd brak aan dat de aarde zodanig was afgekoeld dat de waterdamp in de dampkring condenseerde en als regen neerviel. Het regende miljoenen jaren, lang genoeg om de eerste oceanen te laten ontstaan. En oceanen waren op den duur het enige wat er was: er was geen land. De aarde, ooit een vuurbal, was een bal wa-

ter geworden. Niet dat het daardoor kalmer werd. In die tijden draaide de aarde sneller om haar as dan nu. De nieuwe maan stond vlak boven de zwarte horizon. Elke keer dat het hoog water werd, nam dat de vorm aan van een tsunami.



Een planeet is meer dan een hele hoop stenen. Op alle planeten met een omtrek van meer dan een paar honderd kilometer ontstaan op den duur verschillende lagen. Minder compacte stoffen, zoals aluminium, silicium en zuurstof, gaan met elkaar een lichte steenlaag vlak onder het oppervlak vormen. Compactere stoffen, waaronder nikkel en ijzer, zinken naar de kern. Heden ten dage bestaat de aardkern uit een draaiende bal van vloeibaar metaal. De kern blijft heet door zowel de zwaartekracht als het verval van de zware, radioactieve elementen die pal vóór de oude supernova gevormd werden. Door het draaien van de aarde wordt er in het binnenste ook een magnetisch veld gegenereerd. De ‘tentakels’ daarvan gaan recht door de aarde heen en strekken zich tot ver in de ruimte uit. Zo beschermt het magnetische veld onze planeet tegen de zonnewind, een permanente stroom van deeltjes die aan de zon ontsnappen. Omdat ze elektrisch geladen zijn, worden ze door het magnetische veld afgestoten en vliegen om de aarde heen de ruimte in.

De hitte die door de vloeibare aardkern wordt uitgestraald, houdt de planeet voor altijd aan de kook, als een pan die op een fornuis staat te pruttelen. Door de opstijgende hitte worden de lagen boven de kern zachter, barst de minder compacte maar taaiere aardkorst in stukken en drijven de stukken uit elkaar, waardoor er nieuwe oceanen ontstaan. De aardstukken, de tektonische platen geheten, bewegen constant. Ze botsen tegen elkaar aan, schuren langs elkaar heen of schuiven onder el-

kaar. Daardoor ontstaan er niet alleen diepe geulen in de oceaانبodem, maar ook bergen die er hoog boven uitstijgen. De bewegingen veroorzaken ook aardbevingen en vulkaanuitbarstingen. En ze zorgen voor nieuw land.

Terwijl kale bergen de hoogte in gedreven werden, werden andere delen van de aardkorst naar beneden gezogen, de diepe oceaangeulen aan weerszijden van de tektonische platen in. Geladen met sediment en water verdwenen grote stukken van de korst naar de diepte – om veel later weer in andere vormen aan de oppervlakte te komen. Na honderden miljoenen jaren kon het slijk dat aan de randen van verdwenen continenten op de oceaانبodem lag, via vulkaanuitbarstingen weer naar boven komen,<sup>3</sup> of tot diamanten verhard zijn.



In deze wereld van tumult en rampspoed ontstond het leven. Of beter gezegd, het leven ontstond, ontwikkelde zich en groeide dankzij alle tumult en calamiteiten. Leven ontstond in de diepste diepten van de oceaan, waar de randen van de tektonische platen in de aardkorst staken en kokend heet water, rijk aan mineralen en onder extreme druk, uit de scheuren in de oceaانبodem omhoogkwam.

De eerste levende organismen waren niet meer dan schuimachtige membranen in microscopisch kleine gaatjes in gesteente. Ze ontstonden wanneer opwaartse stromingen zo wild waren geworden dat ze in draaikolken veranderden en bij afnemende kracht hun lading van mineraalrijk afval in de gaten en poriën van stenen achterlieten.<sup>4</sup> Omdat de membranen net zo doorlaatbaar waren als een zeef, konden sommige dingen erdoorheen en andere niet. Maar al waren ze poreus, de wereld binnen de membranen was toch anders dan de maalstroom erbuiten: kalmer en meer geordend. In een arctische storm biedt

een houten hutje met een dak en muren toch beschutting, ook al klapperen de deuren en rammelen de ramen. De membranen maakten van hun doorlaatbaarheid een deugd. Via de gaatjes lieten ze energie en voedingsstoffen binnen en loosden ze afval.<sup>5</sup>

Tegen het chemische geraas van de buitenwereld beschermd, heerste er in de onzichtbaar kleine ruimtes binnen de membranen een relatieve orde. Geleidelijk aan verfijnden ze het genereren van energie, die ze gebruikten om kleine bubbeltjes af te splitsen en die elk in een eigen deeltje van het oudermembraan in te kapselen. Eerst gebeurde dat toevallig, maar gaandeweg werd het proces voorspelbaarder doordat zich in de belletjes een vaste chemische verbinding ontwikkelde die gekopieerd en doorgegeven kon worden aan een volgende generatie van door membranen omsloten bubbeltjes. Met andere woorden, de nieuwe generatie bubbeltjes werden min of meer getrouwe kopieën van hun ouders. En de efficiëntere bubbeltjes gedijden ten koste van de minder goed geordende.

De simpele bubbeltjes staan aan de poort van het leven, in die zin dat ze, hoewel tijdelijk en met de grootste moeite, een manier vonden om de anders onverbiddelijk toenemende entropie, de netto hoeveelheid wanorde in het universum, te stoppen. Dat is een essentieel kenmerk van leven. De schuimachtige bubbeltjes – de eerste celmembranen – stonden als kleine gebalde vuistjes tegenover de levenloze materie.<sup>6</sup>



Afgezien van het bestaan van het leven zelf is de snelheid waarmee het ontstond misschien wel het meest verbazingwekkend. Een luttele 100 miljoen jaar na het ontstaan van de planeet schiep het zichzelf in vulkanische diepten, in een tijd waarin de aarde nog werd gebombardeerd met ruimtelichamen groot

genoeg om de grootste kraters op de maan te slaan.<sup>7</sup> 3,7 miljard jaar geleden had het leven zich al vanuit de eeuwige duisternis van de diepzee een weg gebaand naar de door zonlicht beschenen oppervlaktewateren.<sup>8</sup> 3,4 miljard jaar geleden bouwden triljoenen organismen samen al riffen die vanuit de ruimte te zien waren.<sup>9</sup> Toen al was er volop leven op aarde.

De riffen werden echter niet uit koralen opgebouwd: daarop moest de aarde nog 3 miljard jaar wachten. Ze bestonden uit lagen flinterdunne, groenige draden en stukjes slijm gemaakt van micro-organismen genaamd cyanobacteriën, de bacteriën die ook verantwoordelijk zijn voor de blauwgroene laag op hedendaagse vijvers. De lagen kwamen over stenen en zeebeddingen te liggen en verdwenen bij de volgende storm weer onder het zand. Maar doordat ze steeds weer opnieuw gelegd en bedolven werden, ontstonden er gelaagde bergjes van afzettingen en slijm. Die kussenachtige bergjes, stromatolieten geheten, zouden de meest succesvolle vorm van leven ooit op aarde worden. Ze waren 3 miljard jaar lang de onbetwiste heersers op aarde.<sup>10</sup>



De planeet waarop het leven begon, was warm,<sup>11</sup> maar stil: de enige geluiden waren die van de wind en de zee. De wind bracht lucht in beweging waarin bijna geen zuurstof zat. Zonder de beschermende ozonlaag in de stratosfeer werd alles wat zich boven of vlak onder het zeeoppervlak bevond, gesteriliseerd door de ultraviolette stralen van de zon. Om zich daartegen te beschermen ontwikkelden de kolonies cyanobacteriën pigmenten die de schadelijke straling absorbeerden. Eenmaal opgenomen kon de energie aan het werk worden gezet. De cyanobacteriën gebruikten de energie als motor voor chemische reacties, waarbij onder andere koolstof-, water-

stof- en zuurstofatomen gefuseerd werden tot suikers en zetmeel. Dit proces noemen we fotosynthese. Een schadelijke kracht was omgezet in een vruchtbare kracht.

Vandaag de dag wordt het pigment van planten dat zonne-energie omzet in chemische energie, chlorofyl of bladgroen genoemd. Met de zonne-energie wordt water gespleten in de elementen waterstof en zuurstof en met de energie die daarbij vrijkomt, kunnen volgende chemische reacties plaatsvinden. Maar in de vroegste tijden was de kans even groot dat de grondstoffen mineralen waren die ijzer of zwavel bevatten. De beste en overvloedigste grondstof was en is echter water. Toch kleefde ook daar een groot probleem aan. Bij de fotosynthese van water komt als afvalstof namelijk een kleurloos en geurloos gas vrij dat alles verbrandt waarmee het in contact komt. Het is een van de dodelijkste stoffen in het heelal. De naam? Dizuurstof of O<sub>2</sub>.

Voor het vroegste leven, dat was ontstaan in een oceaan en onder een dampkring waarin geen dizuurstof, ook wel moleculaire zuurstof genoemd, zat, betekende de stof een milieuramp. Om de zaken in perspectief te plaatsen: toen de cyanobacteriën de eerste pogingen tot fotosynthese deden die zuurstof opleverden – 3 miljard jaar geleden of meer – kwam daar zelden genoeg giftige dizuurstof bij vrij om meer dan kleine sporen na te laten. Niettemin is het gas zo krachtig dat zelfs een spoortje al rampspoed betekende voor leven dat zich zonder zuurstof had ontwikkeld. De wolkjes dizuurstof, waardoor levende wezens generaties lang verbrand werden, veroorzaakten de eerste van de vele massavernietigingen in de geschiedenis van de aarde.



De hoeveelheid dizuurstof nam toe tijdens de zogeheten *Great Oxidation* (de Grote Oxidatie). In die turbulente periode tussen pakweg 2,4 en 2,1 miljard jaar geleden nam het zuurstofgehalte in de dampkring om nog onbekende reden zodanig toe dat het boven het huidige percentage van 21 procent uitkwam. Daarna daalde het weer tot iets minder dan 2 procent. Volgens moderne maatstaven mag dat dan veel te weinig zijn om te kunnen ademen, het had toch enorme gevolgen voor het ecosysteem.<sup>12</sup>

Door oplevende tektonische activiteit werden massa's koolstofrijk organisch bezinksel – de restanten van vele generaties levende wezens – onder de oceaanbodem begraven. Er kon dus geen zuurstof meer bij komen. Dat leidde tot een overschot aan dizuurstof, dat reageerde met alles waarmee het in contact kwam. Gesteente werd erdoor aangetast, ijzer ging roesten en koolstof veranderde in kalksteen.

Tegelijkertijd zorgden alle nieuw gevormde steenmassa's ervoor dat gassen als methaan en koolstofdioxide aan de dampkring onttrokken werden. Methaan en kooldioxide zijn twee van de gassen in de donzige vulling van de deken die de aarde warm houdt en verhogen dus het broeikas-effect. Aan de atmosfeer onttrokken, kwam de aarde in de eerste en langste van de vele ijstijden terecht. 300 miljoen jaar lang was de hele aardbol, van pool tot pool, met ijskappen bedekt. En toch waren de Great Oxidation Event en het daaropvolgende tijdperk van de 'Sneeuwbal-aarde' het soort apocalyptische rampen waar het leven op aarde altijd van geprofitteerd heeft. Veel organismen gingen dood, maar het leven kreeg de aanzet tot de volgende revolutie.



Gedurende de eerste 2 miljard jaar van het bestaan van de aarde was de meest ontwikkelde levensvorm op bacteriële cellen gebouwd. Zulke cellen lijken heel simpel, of ze nu apart staan, samengeklit tapijten over de oceaanbodem vormen, of voorkomen in de gedaante van lange en als engelenhaar zo dunne draden, zoals de cyanobacteriën. Ze zijn ook heel klein. Op de punt van een speld passen net zoveel bacteriën als er flierefluiters naar Woodstock gingen en dan nog is er ruimte over.<sup>13</sup>

Maar hoe simpel en oninteressant bacteriële cellen er onder de microscoop ook uitzien, die eenvoud is misleidend. Ze kunnen zich aan nagenoeg alles en iedere plek aanpassen. Op en in een menselijk lichaam zitten veel meer bacteriële cellen dan menselijke cellen. Er zijn natuurlijk bacteriën die ernstige ziektes veroorzaken, maar we zouden niet kunnen overleven als de bacteriën in onze darmen en maag niet hielpen met de spijsvertering.

En ondanks de grote verschillen in zuurgraad en temperatuur in het menselijk lichaam, is het een prettige plek voor ze. Er zijn bacteriën waarvoor de hitte van een kokende ketel als een zachte lentedag is. Er zijn bacteriën die gedijen op ruwe olie, op oplosmiddelen die bij de mens kanker veroorzaken en zelfs op kernafval. Sommige bacteriën kunnen het vacuüm in de ruimte overleven, de meest extreme temperatuur of druk doorstaan of in zoutkorrels opgesloten zitten en dat miljoenen jaren lang.<sup>14</sup>

Hoe klein ook, bacteriële cellen staan er ook om bekend dat ze graag samen zijn. Verschillende soorten bacteriën drommen samen om chemische stoffen uit te wisselen. De afvalstoffen van de ene soort kunnen een maaltijd zijn voor een andere. Stromatolieten, die zoals we eerder zagen de eerste zichtbare tekenen van leven op aarde waren, waren kolonies van allerlei

bacteriesoorten. Bacteriën kunnen zelfs genetisch materiaal met elkaar ruilen. Dat is ook de reden waarom ze nu resistent worden tegen antibiotica. Als een bacterie het resistentiegeen tegen een bepaald antibioticum niet heeft, kan het dat gratis en voor niks oppikken van een andere soort in de buurt.

De gewoonte van bacteriën om gemeenschappen van verschillende soorten te vormen, leidde tot de volgende grote evolutionaire vernieuwing. Zij tilden het samenleven naar een ander niveau: de celkern.



Op enig moment vóór 2 miljard jaar geleden namen kleine bacteriekolonies de gewoonte aan om samen te gaan leven in een membraan.<sup>15</sup> Het begon ermee dat een eencellige, een zogeheten archaeon,<sup>16</sup> voor vitale voedingsstoffen afhankelijk was van naburige cellen. Dat celletje ontwikkelde tentakels naar de burens die de uitwisseling van stoffen en genen gemakkelijker maakten. De leden van wat eerst een losse leefgemeenschap van cellen was, werden steeds afhankelijker van elkaar.

Elk lid richtte zich op één aspect van het leven.

Cyanobacteriën specialiseerden zich in het oogsten van zonlicht en werden chloroplasten – bladgroenkorrels die nu in plantencellen te vinden zijn. Andere soorten wijdden zich aan het winnen van energie uit voedsel en werden de kleine, roze energiefabriekjes die mitochondriën worden genoemd en in zo goed als alle cellen met een celkern zitten, of het nu planten of dieren betreft.<sup>17</sup> Wat ook hun specialisme was, alle cellen brachten hun genetische materiaal in in de centrale archaeon. Dat werd daarmee de celkern – de bibliotheek waarin alle genetische informatie, het geheugen en het hele erfgoed werd bewaard.<sup>18</sup>

Dankzij de werkverdeling werd het leven in de kolonie efficiënter en meer gestroomlijnd. Wat ooit een onsamenhangende kolonie was, werd een geïntegreerd geheel, een nieuwe levensorde – een cel met een kern, ofwel een eukaryote cel. Een organisme met een eukaryote cel, of het nu eencellig of meercellig is, wordt een eukaryoot genoemd.<sup>19</sup>



De evolutie van de celkern maakte ook een beter georganiseerd voortplantingsmechanisme mogelijk. Bacteriële cellen reproduceren zich doorgaans door zich in tweeën te splitsen, zodat er twee identieke kopieën van de oudercel ontstaan. De oorzaak van verschillen is dat er bij de deling toevallig een stukje extra genetisch materiaal meekomt.

Bij de eukaryoten daarentegen produceren beide ouders speciale voortplantingscellen als voertuigen voor de gechooreografeerde uitwisseling van genetisch materiaal. Daarbij worden de genen van beide ouders gemixt en ontstaat er een blauwdruk voor een individu dat niet identiek aan hen is, maar van allebei verschilt. We noemen deze meer verfijnde uitwisseling van genetisch materiaal ‘seks’.<sup>20</sup> Die leidde tot meer genetische verschillen en dus tot diversiteit. Zo evolueerde er allerlei eukaryoten en mettertijd ontstonden er verzamelingen van eukaryoten die meercellige organismen gingen vormen.<sup>21</sup>

De eerste eukaryoten kwamen op rustige en onopvallende wijze tussen ongeveer 1850 en 850 miljoen jaar geleden tot ontwikkeling.<sup>22</sup> De diversificatie begon zo’n 1200 miljoen jaar geleden. Toen ontstonden zowel de organismen die we als vroege eencellige verwanten van de algen en schimmels herkennen als de eencellige protisten, die vroeger protozoën werden genoemd.<sup>23</sup> Dat waren ook de eerste levende wezens die

zich buiten de zeeën waagden en in het binnenland zoetwaterpoelen en rivieren koloniseerden.<sup>24</sup> Korsten van algen, schimmels en mossen vormden zich op kusten waarop eerder geen leven was geweest.<sup>25</sup>

Een aantal van die organismen experimenteerde zelfs met meercellig leven, zoals het 1200 miljoen jaar oude zeewier *Bangiomorpha*<sup>26</sup> en de circa 900 miljoen jaar oude schimmel *Ourasphaira*.<sup>27</sup> Maar er waren nog vreemdere dingen. De oudst bekende aanwijzingen van meercellig leven dateren al van 2100 miljoen jaar geleden. Die schepsels waren in een paar gevallen zelfs twaalf centimeter in doorsnede, dus niet echt microscopisch te noemen. Maar in onze moderne ogen hebben ze zulke rare vormen dat hun relatie met algen, schimmels of andere organismen mistig is.<sup>28</sup> Misschien waren het een soort bacteriekolonies, maar het kan ook niet worden uitgesloten dat er ooit hele groepen levende organismen – bacteriën, eukaryoten of iets heel anders – bestonden die uitstierven zonder een spoor achter te laten en die we daarom moeilijk kunnen begrijpen.



Het eerste gerommel van de naderende storm kwam in de vorm van het opbreken van het supercontinent Rodinia. Tot dan toe hadden alle landmassa's van enige omvang die er op aarde waren, deel uitgemaakt van dat continent.<sup>29</sup> Het opbreken leidde tot een reeks ijstijden zoals die er sinds de Great Oxidation niet meer geweest waren. Ze duurden 80 miljoen jaar en net als eerder was de hele planeet weer met ijskappen bedekt. Maar opnieuw ging het leven de uitdaging aan.

Het leven was in de vorm van vreedzame zeewieren, algen, schimmels en mossen tot de inventaris van onze planeet gaan behoren.

En het kwam sterk, beweeglijk en strijdbaar uit deze periode tevoorschijn.

Want zoals het leven op aarde in vuur was gesmeed, zo werd het gehard in ijs.