

Nick Lane

DE BELANGRIJKSTE
VRAAG VAN HET LEVEN



Waarom is het leven zoals het is?

Vertaald door Mario Molegraaf

2018 Prometheus Amsterdam

Voor Ana
Mijn inspiratie en metgezel
Op deze magische reis

Oorspronkelijke titel *The Vital Question*

© 2015 Nick Lane

© 2018 Nederlandse vertaling Uitgeverij Prometheus en
Mario Molegraaf

Omslagontwerp DPS Design & Prepress Studio

Foto auteur Wide Eyed Entertainment Ltd

Zetwerk Elgraphic bv, Vlaardingen

www.uitgeverijprometheus.nl

ISBN 978 90 446 3658 1

WAT IS HET LEVEN?



Zonder enige emotie inspecteren radiotelescopen dag en nacht de hemel. Tweeënveertig staan verspreid in een losse groep over de met struikgewas bedekte siërra van Noord-Californië. Hun witte schotels doen denken aan uitdrukingsloze gezichten, allemaal in koor hoopvol gericht op een bepaald punt achter de horizon, alsof dit een verzamelpunt was voor buitenaardse invallers die proberen naar huis te gaan. De ongerijmdheid is treffend. De telescopen zijn van SETI (search for extraterrestrial intelligence – zoektocht naar buitenaardse intelligentie), een organisatie die de hemel al een halve eeuw afzoekt op tekenen van leven, zonder resultaat. Zelfs de voorvechters zijn niet al te optimistisch over de kansen op succes, maar toen een paar jaar geleden het geld opraakte, was na een rechtstreeks beroep op het publiek de Allen Telescope Array snel weer operationeel. In mijn beleving is de onderneming een roerend symbool van de onzekerheid van de mensheid over onze plaats in het universum en eigenlijk van de kwetsbaarheid van wetenschap zelf: zulke ondoorgroondelijke sciencefiction-technologie dat die op alwetendheid zinspeelt, op een zo naïeve droom gericht dat die nauwelijks op wetenschap is gebaseerd, de droom dat wij niet alleen zijn.

Ook al detecteert de serie telescopen nooit leven, kostbaar is die wel. Het mag niet mogelijk zijn door deze telescopen de verkeerde kant op te kijken, toch is dat hun eigenlijke kracht. Waarnaar zoeken

we precies daar buiten? Zou het leven elders in het universum zoveel op ons leven lijken dat het ook radiogolven gebruikt? Gaan we ervan uit dat het leven elders op koolstof moet zijn gebaseerd? Zou het water nodig hebben? Zuurstof? Dit zijn niet écht vragen over de aard van het leven op een andere plek in het universum: ze gaan over het leven op aarde, waarom het leven is zoals we het kennen. Deze telescopen zijn spiegels, die hun vragen reflecteren naar aardse biologen. Het probleem is dat het in de wetenschap helemaal om voorspellingen draait. De dringendste vragen in de natuurkunde gaan over *waarom* de natuurwetten zijn zoals ze zijn: welke fundamentele beginselen voorspellen de bekende eigenschappen van het universum? Biologie is minder voorspellend, en heeft geen wetten die met de wetten uit de natuurkunde zijn te vergelijken, maar de voorspellende kracht van de evolutionaire biologie is beschamend zwak. We weten een heleboel over de moleculaire technieken van evolutie en over de geschiedenis van het leven op onze planeet, maar veel minder over welke onderdelen van deze geschiedenis toeval zijn – ontwikkelingen die op andere planeten totaal verschillend hadden kunnen verlopen – en welke stukjes door wetten of beperkingen uit de natuur zijn bepaald.

Dat ligt niet aan gebrek aan inzet. Dit gebied is de speelplaats voor gepensioneerde Nobelprijswinnaars en andere giganten uit de biologie, maar al hun kennis en intellect ten spijt kunnen ze onderling geen begin van overeenstemming bereiken. Veertig jaar geleden, in de begintijd van de moleculaire biologie, schreef de Franse bioloog Jacques Monod zijn beroemde boek *Le hasard et la nécessité*, waarin kil wordt vastgesteld dat de oorsprong van het leven op aarde stom toeval was en dat we alleen zijn in een leeg universum. De slotregels van het boek liggen tegen poëzie aan, een mengeling van wetenschap en metafysica:

Het oude convenant ligt aan stukken; de mens beseft uiteindelijk dat hij alleen is in de meedogenloze immensiteit van het universum, waaruit hij slechts door toeval tevoorschijn kwam. Zijn lot wordt nergens verklaard, evenmin als zijn plicht. Het koninkrijk boven of de duisternis beneden: aan hem is de keus.

Sindsdien hebben anderen het tegendeel beweerd: dat het leven een onvermijdelijke uitkomst is van kosmische chemie. Het zal snel ontstaan, vrijwel overal. Wanneer er eenmaal leven op een planeet gedijt, wat gebeurt er dan? Opnieuw is er geen consensus. Technische beperkingen dwingen het leven misschien convergerende routes te nemen naar vergelijkbare plaatsen, ongeacht waar het begint. Vanwege de zwaartekracht zullen dieren die vliegen waarschijnlijk licht van gewicht zijn en iets bezitten wat op vleugels lijkt. In meer algemene zin is het voor het leven misschien noodzakelijk cellulair te zijn: te bestaan uit kleine eenheden die hun binnenkanten apart houden van de buitenwereld. Als zulke beperkingen domineren, lijkt het leven elders misschien veel op het leven op aarde. Anderzijds: wellicht heerst het toeval – hangt de aard van het leven af van willekeurige overlevenden van wereldwijde rampen zoals de inslag van de asteroïde die de dinosaurussen uitroeide. Zet de klok terug naar de tijd van het Cambrium, een half miljard jaar geleden, toen voor het eerst veel dieren verschenen in de fossiele gegevens, en laat de tijd dan weer vooruitgaan. Zou die parallelle wereld gelijk zijn aan de onze? Misschien zou het in de heuvels krioelen van enorme aard-octopussen.

Een van de redenen om telescopen op de ruimte te richten is dat we hier op aarde te maken hebben met een steekproefomvang van één. Vanuit statistisch oogpunt kunnen we niet zeggen wat, als er al iets is, de evolutie van het leven op aarde beperkte. Maar als dat werkelijk het geval was, zou er geen basis zijn voor dit boek of voor enig ander boek. De natuurwetten gelden in heel het universum, evenals de eigenschappen en dichtheid van de elementen, vandaar de plausibele chemie. Het leven op aarde heeft allerlei vreemde eigenschappen die eeuwenlang de grootste geesten uit de biologie op de proef hebben gesteld – eigenschappen als seks en veroudering. Als we op grond van basisbeginselen – op grond van de chemische aard van het universum – konden voorspellen waarom zulke eigenschappen ontstonden, waarom het leven is zoals het is, dan zouden we weer toegang krijgen tot de wereld van statistische waarschijnlijkheid. Het leven op aarde is niet echt een steekproef van één, voor prakti-

sche doeleinden is het juist een oneindige variatie van organismen die zich in een oneindige tijdsduur ontwikkelen. Toch voorspelt de evolutietheorie niet, op grond van basisbeginselen, waarom het leven op aarde de weg nam die het heeft genomen. Ik bedoel hiermee niet dat volgens mij de evolutietheorie niet klopt – die klopt wél – maar eenvoudig dat die niet voorspelt. Ik bepleit in dit boek dat er inderdaad sterke beperkingen zijn voor evolutie – energetische beperkingen – die het mogelijk maken op grond van basisbeginselen voorspellingen te doen over de fundamenteelste kenmerken van het leven. Voor we op deze beperkingen kunnen ingaan, moeten we bekijken waarom evolutionaire biologie niet voorspellend is, en waarom deze energetische beperkingen nauwelijks zijn opgemerkt. Sterker nog, waarom we zelfs nauwelijks hebben gemerkt dat er een probleem bestaat. Het is pas de laatste paar jaar volkomen duidelijk geworden, en alleen voor wie de evolutionaire biologie bijhoudt, dat er in het hart van de biologie een diepe en verontrustende discontinuïteit bestaat.

Tot op zekere hoogte kunnen we deze treurige toestand aan DNA wijten. Ironisch genoeg begon de moderne periode van de moleculaire biologie, en alle buitengewone DNA-technologie die erbij komt kijken, in feite bij een natuurkundige, om precies te zijn bij de publicatie van Erwin Schrödingers boek *What is Life?* in 1944. Schrödinger deed twee essentiële uitspraken. Ten eerste dat het leven op een of andere manier de universele neiging tot verval weerstaat, het toenemen van entropie (wanorde), vastgelegd in de tweede wet van de thermodynamica. En ten tweede dat de kneep van het plaatselijke ontwijken van entropie door het leven in de genen zit. Hij opperde dat het genetische materiaal een ‘aperiodiek’ kristal is, dat geen zich strikt herhalende structuur heeft en zich zodoende kan gedragen als een ‘codescript’ – naar men zegt de eerste keer dat deze term in de biologische literatuur viel. Schrödinger veronderstelde zelf, evenals de meeste biologen destijds, dat het betreffende quasikristal een eiwit moest zijn, maar binnen een heftig decennium hadden Crick en Watson de kristalstructuur van DNA zelf bepaald. In hun tweede *Nature*-artikel uit 1953 schreven ze: ‘Het lijkt daarom waar-

schijnlijk dat de precieze sequentie van de basen de code is die de genetische informatie bevat.' Die zin is de basis van de moderne biologie. Vandaag de dag is biologie informatie, genoomsequenties worden *in silico* gemaakt, en het leven wordt omschreven in termen van informatieoverdracht.

Genomen zijn de toegangspoort tot een toverland. De riemen code, 3 miljard letters in ons eigen geval, lezen als een experimentele roman, een bijvragen coherent verhaal in korte hoofdstukken, onderbroken door stukken zich herhalende tekst, dichtregels, blanco pagina's, innerlijke monologen, plus een rare interpunctie. Een klein deel van ons eigen genoom, nog geen 2 procent, codeert voor eiwitten; een groter deel is regulerend; en de functie van de rest dreigt enorme ruzies te veroorzaken tussen overigens beleefde wetenschappers.¹ Het is hier niet van belang. Duidelijk is dat genomen tienduizenden genen kunnen coderen en een heleboel van de regulerende complexiteit, in staat alles te specificeren dat nodig is om een rups tot een vlinder te laten transformeren, of een kind tot een volwassen mens. Als we de genomen van dieren, planten, schimmels en eencellige amoeben vergelijken, zien we dat dezelfde processen gaande zijn. We kunnen varianten van dezelfde genen vinden, dezelfde regulerende elementen, dezelfde zelfzuchtige replicatoren (zoals virussen) en dezelfde stukken zich herhalende onzin bij genomen in heel andere soorten en maten. Uien, tarwe en amoeben hebben meer genen en meer DNA dan wij. Amfibieën zoals kikkers en salamanders hebben genomen met afmetingen die meer dan een factor honderd kunnen verschillen: sommige salamandergenomen zijn veertig keer groter dan onze eigen genomen, terwijl die van ons meer dan drie keer zo groot zijn als van sommige kikkers. Als we de architectonische beperkingen van genomen in één zin moesten opsommen, moest dat wel 'alles kan' zijn.

Dat is belangrijk. Als genomen informatie zijn en er geen fundamentele beperkingen zijn voor grootte en structuur van genomen, dan zijn er ook geen beperkingen voor informatie. Wat niet wil zeggen dat er helemaal geen beperkingen voor genomen zijn. Die zijn er natuurlijk wel. Tot de krachten die inwerken op genomen horen na-

tuurlijke selectie en meer willekeurige factoren – toevallige duplicaties van genen, chromosomen of hele genomen, inversies, schrappingen en invasies van parasitair DNA. Hoe dit allemaal afloopt, hangt af van factoren zoals niche, concurrentie tussen soorten en populatieomvang. Vanuit onze optiek zijn al deze factoren onvoorspelbaar. Ze zijn onderdeel van het milieu. Als het milieu precies wordt gespecificeerd, zouden we misschien de genomgrootte van een bepaalde soort kunnen voorspellen. Maar een oneindig aantal soorten leeft in een eindeloze variatie aan micromilieus, uiteenlopend van de binnenkant van andere cellen tot menselijke steden of de dieptes van de oceaan met hoge druk. Het is eerder ‘alles zou kunnen’ dan ‘alles kan’. We zouden verwachten evenveel variatie in genomen aan te treffen als er factoren zijn die in deze verschillende milieus op hen inwerken. Genomen voorspellen niet de toekomst, maar roepen het verleden op: ze weerspiegelen de behoeftes uit de geschiedenis.

Denk nog eens aan andere werelden. Als het leven om informatie draait en informatie onbeperkt is, dan kunnen we niet voorspellen hoe het leven er op een andere planeet kan uitzien, alleen dat het niet in strijd zal zijn met de natuurwetten. Zodra er enige vorm van erfelijk materiaal is ontstaan – DNA of iets anders – gaat de evolutie zich zonder beperkingen door informatie ontwikkelen, en laat zich niet op grond van basisbeginselen voorspellen. Wat zich in de praktijk vormt, zal afhangen van het exacte milieu, de toevalligheden van de geschiedenis en het vernuft van de selectie. Maar kijk terug naar de aarde. Deze uitspraak is aanvaardbaar voor de enorme variatie aan leven zoals die tegenwoordig bestaat, maar geldt eenvoudig niet voor het grootste deel van de lange historie van de aarde. Het lijkt of het leven miljarden jaren werd beperkt op manieren die zich niet eenvoudig in termen van genomen, geschiedenis of milieu laten verklaren. Tot voor kort was de vreemde geschiedenis van het leven op onze planeet verre van duidelijk, en ook nu is er nog veel gedoe over de details. Laat me de visie schetsen die aan het opkomen is en die naast oudere versies leggen die inmiddels onjuist lijken.

Een korte geschiedenis van de eerste 2 miljard jaar van het leven

Onze planeet is ongeveer 4,5 miljard jaar oud (4500 miljoen jaar dus). In de vroege geschiedenis ervan, zo'n 700 miljoen jaar lang, had de planeet te lijden onder een zwaar asteroïdenbombardement, omdat het pas ontstane zonnestelsel zich installeerde. Door een kolossale vroege botsing met een object van Mars-formaat werd waarschijnlijk de maan gevormd. In tegenstelling tot de aarde, met haar actieve geologie die de korst voortdurend ondersteboven gooit, bewaart het ongerepte oppervlak van de maan sporen van dit vroege bombardement: de kraters ervan, te dateren via rotsen die de Apollo-astronauten mee naar huis namen.

Ondanks de afwezigheid van aardse rotsen van vergelijkbare leeftijd zijn er toch een paar aanwijzingen voor de omstandigheden op de vroege aarde. Met name de samenstelling van zirkonen (kristalletjes zirkonium-silicaat, kleiner dan zandkorrels, in vele rotsen te vinden) wijzen erop dat er veel vroeger dan we hadden gedacht oceanen bestonden. Uit uraniumdatering kunnen we opmaken dat sommige van deze verbazend robuuste kristallen tussen de 4 en 4,4 miljard jaar geleden werden gevormd, en zich later in sedimentaire rotsen als puinkorrels ophoopten. Zirkoonkristallen gedragen zich als kooitjes die chemische onreinheden vangen, en daarmee het milieu weerspiegelen waarin ze werden gevormd. De chemie van vroege zirkonen wijst erop dat ze bij relatief lage temperaturen en in aanwezigheid van water werden gevormd. Zirkoonkristallen roepen dus allerminst het beeld op van een vulkanische hel met oceanen van kokend lava – zo levendig vastgelegd in artistieke impressies van wat formeel het Hadeïcum heet – maar wijzen op een rustiger waterwereld met een beperkt landoppervlak.

Ook het oude idee van een oeratmosfeer vol gassen zoals methaan, waterstof en ammoniak, die met elkaar reageren tot organische moleculen, houdt niet stand bij het bekijken van zirkonen. Sporelementen zoals cerium zijn meestal in hun geoxideerde vorm in zirkoonkristallen geïncorporeerd. Het hoge ceriumgehalte in de

vroegste zirkonen wijst erop dat de atmosfeer werd gedomineerd door geoxideerde gassen afkomstig van vulkanen, met name koolstofdioxide, waterdamp, stikstofgas en zwaveldioxide. De samenstelling van dit mengsel lijkt wel op de lucht van tegenwoordig, alleen ontbrak zuurstof zelf, dat was er pas veel later volop, na de komst van fotosynthese. De aard van een sinds lang verdwenen wereld aflezen uit een paar verspreide zirkoonkristallen betekent dat je veel gewicht hecht aan wat neerkomt op zandkorrels, maar het is beter dan helemaal geen sporen. Die sporen roepen steevast een planeet op die verrassend veel lijkt op de planeet die we nu kennen. Door een inslag van een asteroïde af en toe zullen de oceanen deels zijn verdampt, maar het is niet waarschijnlijk dat enige bacterie die in de diepe oceanen leefde er last van had – als zich tenminste al bacteriën hadden ontwikkeld.

De vroegste aanwijzing voor leven is al even broos, maar gaat misschien terug tot een van de oudste bekende rotsen op Isua en Akilia in Zuidwest-Groenland, ongeveer 3,8 miljard jaar oud (zie **afbeelding 2** voor een tijdlijn). Dit zijn geen aanwijzingen in de vorm van fossielen of complexe moleculen, afgeleid van levende cellen ('biomarkers'), het gaat simpelweg om een niet-willekeurige verzameling koolstofatomen in grafiet. Je hebt koolstof in twee stabiele vormen, ofwel isotopen, die een marginaal afwijkende massa hebben.² Enzymen (eiwitten die reacties katalyseren in levende cellen) hebben enige voorkeur voor de lichtere variant, koolstof-12, die zich daarom pleegt op te hopen in organische stof. U kunt koolstofatomen zien als miniatuurpingpongballen – de iets kleinere ballen stuiten iets sneller rond, hebben dus meer kans tegen enzymen te botsen, hebben dus meer kans in organische koolstof te worden omgezet. Omgekeerd heeft de zwaardere vorm, koolstof-13, slechts 1,1 procent van het totaal aan koolstof, meer kans achter te blijven in de oceanen en kan zich ophopen wanneer carbonaat bezinkt in sedimentaire rotsen als kalksteen. Deze kleine verschillen zijn zo consequent dat ze vaak als kenmerkend voor het leven worden gezien. Niet alleen koolstof maar ook andere elementen als ijzer, zwavel en stikstof worden op vergelijkbare wijze door levende delen gefracratio-

neerd. Dergelijke isotopenfractionatie is vastgelegd in de grafietinclusies van Isua en Akila.

Elk aspect van dit onderzoek is omstreden, vanaf de leeftijd van de rotsen zelf tot en met het bestaan van de koolstofkorreltjes die op leven zouden wijzen. Bovendien is duidelijk geworden dat isotopische fractionatie helemaal niet uniek is voor het leven, maar door geologische processen in hydrothermale uitlaten kan worden nagebootst, zij het in zwakkere vorm. Als de Groenlandse rotsen echt zo oud zijn als ze lijken en ze inderdaad gefractioneerd koolstof bevatten, is dat nog steeds geen bewijs voor leven. Dit mag ontmoedigend lijken, maar is in andere zin precies wat we mochten verwachten. Ik zal bepleiten dat het onderscheid tussen een 'levende planeet' – een geologisch actieve planeet – en een levende cel slechts een kwestie van definitie is. Er is geen keiharde scheidslijn. Geochemie leidt naadloos tot biochemie. Zo bezien is het logisch dat we in deze oude rotsen geen onderscheid kunnen maken tussen geologie en biologie. Er is sprake van een levende planeet die leven laat ontstaan, en de twee kunnen niet uit elkaar worden gehaald zonder een continuüm te scheiden.

Ga een paar honderd miljoen jaar vooruit en het bewijs voor leven is tastbaarder – zo stevig en onderzoekbaar als de oude rotsen van Australië en Zuid-Afrika. Hier zijn er microfossielen die veel op cellen lijken, al is het een ondankbare taak te proberen ze in moderne groepen onder te brengen. Vele van deze fossieltjes zijn bekleed met koolstof, wat opnieuw veelzeggende isotopenvingerafdrukken oplevert, maar nu iets consistentier en geprononceerder: ze wijzen eerder op georganiseerde stofwisseling dan op lukrake hydrothermale processen. En er zijn structuren die doen denken aan stromatolieten, de koepelvormige kathedralen van bacterieel leven waarin cellen laag op laag groeien: de begraven lagen mineraliseren, veranderen in steen, om zich uiteindelijk op te stapelen tot opvallende gelaagde rotsstructuren van een meter hoog. Naast deze directe fossielen zijn er, 3,2 miljard jaar oud, grootschalige geologische elementen, met een oppervlakte van honderden vierkante kilometers en een diepte van tientallen meters, met name 'banded iron formations' (BIF's) en kool-