

## Leven in het heelal - Oratie P. Ehrenfreund

Prof. P. Ehrenfreund  
Leiden Observatory  
PO Box 9513  
2300 RA Leiden  
email: [pascale@strw.leidenuniv.nl](mailto:pascale@strw.leidenuniv.nl)

Prof. P. Ehrenfreund  
Afdeling Sterrenkunde  
Katholieke Universiteit Nijmegen  
PO Box 9010, 6500GL Nijmegen

Op dit moment zijn we nog ver verwijderd van een eenduidig beeld van de ontstaansgeschiedenis van het leven op aarde en een antwoord op de vraag of leven elders in het heelal voorkomt. Het nieuwe interdisciplinaire vakgebied Astrobiologie zoekt antwoorden op de fundamentele vragen over het ontstaan, de evolutie, de verspreiding en het lot van het leven, waar dan ook. Voor het ontrafelen van de oorsprong van het leven is kennis nodig over het vroege zonnestelsel en de primitieve aarde, zoals de samenstelling van de atmosfeer, de temperatuur van het oppervlak en de pH-waarde van de oceanen. Tot op heden bestaat hierover echter geen definitief bewijs. Fossielen van de eerste Archaea zijn zeer zeldzaam, de meeste versteende bewijzen zijn verloren gegaan door erosie en plaattectoniek. Er wordt veel gediscussieerd over de exacte leeftijd van de vermoedelijk oudste vormen van leven zoals fossielen en ingevangen koolstofdeeltjes in stenen, er is echter wel overeenstemming over het feit dat leven is ontstaan in de eerste miljard jaar na het ontstaan van de aarde.

Leven zoals wij het kennen is een chemisch fenomeen. Het leven op aarde is gebaseerd op de genetische materialen DNA en RNA, op eiwitten en membranen. DNA heeft een dubbele helixstructuur, en is opgebouwd uit drie verschillende onderdelen: nucleobasen, suikers en fosfaten. Eiwitten zijn lange ketens van aminozuren, die complexe driedimensionale structuren vormen en een centrale rol in biologische katalyse spelen. De kernvraag in het onderzoek naar het ontstaan van leven is welke chemische processen deze systemen hebben geproduceerd. Hierover bestaan verschillende concurrerende theorieën. Ondanks hun diversiteit hebben theorieën over een "prebiotische oersoep", over "hydrothermal vents" op de bodem van de oceanen, en over buitenaardse afkomst van organische verbindingen, dezelfde achterliggende gedachte dat abiotische organische verbindingen nodig waren voor het opstaan van leven.

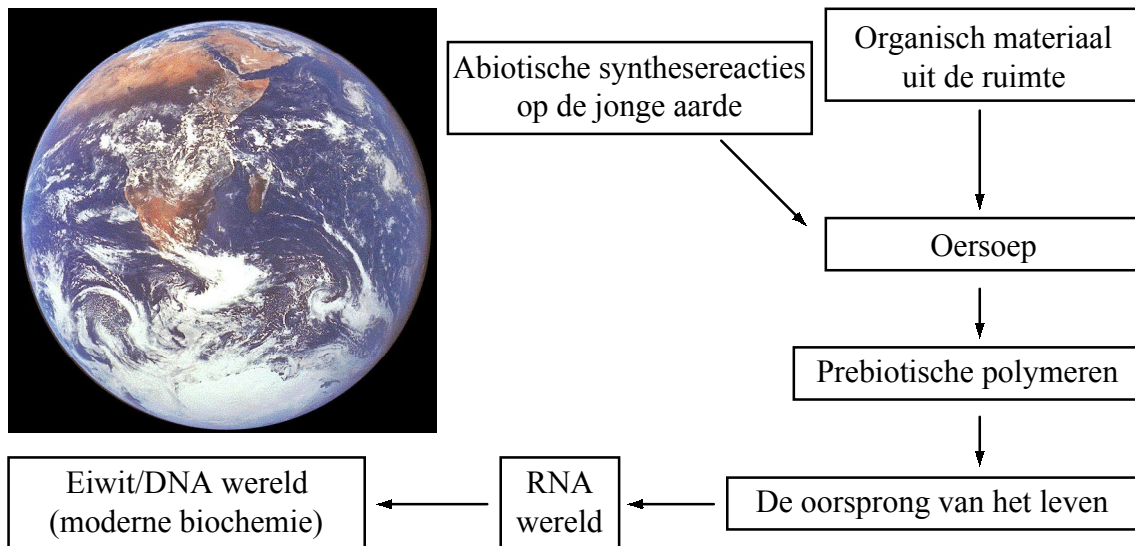
### 2003: de 50ste verjaardag van twee mijlpalen in de biochemie

- a) de opheldering van de structuur van deoxyribonucleic acid (DNA), het centrale genetische materiaal in alle levende organismen
- b) het Miller-Urey experiment, de synthese van aminozuren door elektrische ontlading onder omstandigheden die de atmosfeer van de primitieve aarde nabootsten.

Zoals Miller en Orgel schreven in hun bekende boek "The origin of life on Earth" (1974):  
"We moeten toegeven dat we niet weten hoe het leven begonnen is. Het wordt algemeen aangenomen dat een verscheidenheid aan processen heeft geleid tot de vorming van eenvoudige organische verbindingen op de vroege aarde. Deze verbindingen werden samengevoegd tot steeds complexere structuren totdat er één gevormd werd die levend genoemd kon worden. Niemand zou tevreden moeten zijn met een uitleg als deze."

Het huidige beeld van het ontstaan van leven op aarde is recentelijk samengevat, zie fig 1 [1].

## DE OORSPRONG VAN HET LEVEN OP AARDE



**Fig. 1** - De verschillende stappen waarvan aangenomen wordt dat ze een rol hebben gespeeld in het ontstaan van leven [1].

De tegenwoordig meest geaccepteerde theorie is dat een combinatie van aardse en buitenaardse bronnen heeft gezorgd voor de aanwezigheid van de eerste bouwstenen voor het leven op de jonge aarde. Op katalytische oppervlakken zoals mineralen, reageerden deze eenvoudige moleculen tot complexere structuren die zich vervolgens ontwikkelden tot primitieve cellen.

Vloeibaar water blijkt is essentieel voor de chemie in alle aardse biologische systemen. Recente ontdekkingen laten zien dat leven kan bestaan onder extreme omstandigheden, zoals in geisers, *black smokers* (vulkanen op riffen op de oceanbodem), in woestijnen en in ijsmeren op Antarctica. Deze ontdekkingen breiden onze kennis uit over de bewoonbare zones in ons zonnestelsel en elders in het heelal.

In de volgende hoofdstukken zal ik proberen inzicht te bieden in de koolstofchemie van het heelal, de vorming van ons zonnestelsel en theorieën over het ontstaan van leven op aarde en misschien wel daarbuiten.

### De vorming van zware elementen en moleculen in de interstellaire ruimte

Eén van de voorwaarden voor leven is de aanwezigheid van de elementen als waterstof, koolstof, zuurstof, stikstof, zwavel en fosfor. Met uitzondering van waterstof, het element dat het meeste voorkomt in het heelal, waren deze elementen nog niet gevormd in het vroege heelal. Toen werden alleen hele lichte elementen geproduceerd, voornamelijk waterstof, helium en kleine hoeveelheden deuterium, lithium en beryllium. Alle andere chemische elementen die een rol spelen in de biochemie op aarde, zijn ontstaan door nucleosynthese tijdens de vorming van sterren. Koolstof, het baselement van de organische chemie, wordt gevormd door het zogenoemde triple- $\alpha$  proces ( $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$ ) dat optreedt in de kern van sterren, die zwaarder zijn dan de helft van de massa van onze zon. In de kernen van zich ontwikkelende massieve sterren (10 zonmassa's), worden door het nucleair "verbranden" van zware elementen de meest voorkomende isotopen van zwavel ( $^{32}\text{S}$ ) en fosfor ( $^{31}\text{P}$ ) gevormd. In tegenstelling tot de primaire producten koolstof en zuurstof, is stikstof een secundair product, wat wil zeggen dat voor de

vorming van stikstof koolstof en zuurstof reeds aanwezig moeten zijn, die gevormd zijn in eerdere generatie sterren.

De interstellaire ruimte speelt een centrale rol in de vorming en distributie van zware elementen en de daarop volgende molecuulvorming. Interstellaire wolken leveren het ruwe materiaal voor de vorming van sterren. In een tijdspanne van ongeveer  $10^6$  jaar storten deze wolken in ten gevolge van de eigen zwaartekracht, waarna ze sterren en uiteindelijk planeten vormen. Aan het eind van hun levensduur verliezen sterren hun massa. Dit gebeurt gelijkmatig of door explosies, die de zware elementen het heelal inslingeren. Vooral deze supernova explosies aan het einde van het leven van een ster met een massa van minimaal acht keer die van onze zon, zijn verantwoordelijk voor de snelle en efficiënte verspreiding van elementen in de ruimte. De metalliciteit – in de astrofysica worden alle elementen zwaarder dan waterstof en helium metalen genoemd – van de interstellaire ruimte neemt op deze manier toe. Deze zware elementen zijn cruciaal voor de vorming van complexe moleculen die essentieel zijn voor leven zoals wij het kennen.

De stap van atoomkern naar molecuul begint met de uitstoot van nucleosynthetische producten in de interstellaire ruimte door stellaire winden, supernova explosies en uit planetaire nevels. Organische moleculen worden gevormd in de interstellaire wolken en hun structuur en complexiteit hangen af van de plaats waar de synthese plaatsvond.

In dichte interstellaire wolken waar UV-straling efficiënt geabsorbeerd wordt en niet diep doordringt in de wolk, vindt een actieve gasfasechemie plaats. Deze reacties worden nog versneld door interactie van het gas met de stofdeeltjes, waardoor moleculen gevormd worden die kunnen bestaan uit meer dan 10 atomen. In dit soort omgevingen zijn met behulp van radioastronomie al meer dan 120 moleculen gedetecteerd, waarvan meer dan de helft op koolstofbasis. De meest actieve koolstofchemie vindt waarschijnlijk plaats in de circumstellaire omgeving van koolstofrijke sterren. Acetyleen, een molecuul dat in deze regio's gevormd wordt, vormt de basis voor grotere moleculen zoals aromatische ringen, stabiele ringvormige koolstofmoleculen die extreem resistent zijn tegen straling. Zulke aromatische koolwaterstoffen kunnen op hun beurt weer door winden gedistribueerd worden vanuit circumstellaire regio's de interstellaire ruimte in. Er is bewijs dat vast koolstof, roet genoemd, vergelijkbaar met houtskool op aarde, kan worden gevormd in zulke stellaire omgevingen. Een groot deel van de koolstof in de ruimte lijkt geïntegreerd te zijn in koolstofhoudende aromatische netwerken [2]. Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) behoren tot de meest voorkomende moleculen in het interstellaire gas. Andere minder vaak voorkomende organische moleculen in de interstellaire ruimte zijn koolstofkettingen en wellicht fullerenen.

Het is interessant om te weten dat de koolstofchemie op verschillende plaatsen in de ruimte plaats vindt. Daar worden vele kleine en waarschijnlijk ook hele grote koolstofrijke moleculen gevormd die op aarde ook voor komen, waaronder ook de prebiotische moleculen en hun voorlopers. Veel van deze moleculen zijn spectroscopisch geïdentificeerd door astronomische waarnemingen in verschillende gebieden van het elektromagnetisch spectrum. In veel gevallen vormt een spectrum echter geen eensluidend bewijs voor een bepaalde verbinding, maar kan alleen een groep van moleculen worden geïdentificeerd. Het is opmerkelijk dat dezelfde koolstofchemie door het hele heelal lijkt op te treden en dat bepaalde fenomenen, zoals de UV-extinctie piek bij  $2200 \text{ \AA}$ , die kenmerkend is voor vast koolstof, kunnen worden waargenomen in veel verschillende gebieden van het heelal. Recente resultaten suggereren dat de oorsprong van deze band gehydrogeneerd amorf koolstof is. Koolstofhoudend stof in de interstellaire ruimte laat duidelijke verscheidenheid zien. De  $3,4 \mu\text{m}$  band die hoort bij de C-H strekmodus in alifatisch koolstof, is waargenomen in ons eigen zonnestelsel maar ook daarbuiten. Dit geldt ook voor de

diffuse interstellaire banden (DIBs), een groep van 300 absorptiebanden die overal in het optisch gebied waargenomen worden. Sommige van deze banden worden geassocieerd met stabiele koolstofhoudende moleculen, hoewel hiervan geen definitief bewijs is, dus blijven ze tot op heden ongeïdentificeerd. De sterkste van deze banden kunnen behalve in ons zonnestelsel ook worden waargenomen in andere sterrenstelsels, starburststelsels en supernova's. De koolstofchemie lijkt een universeel pad door het heelal te volgen.

## Het zonnestelsel

De vorming van ons zonnestelsel begon met de instorting van een deel van een interstellaire wolk tot een schijf, de zonnenevel genoemd, gedomineerd door een centrale verdichting waaruit de zon gevormd werd. Gedurende de protostellaire ineenstorting werden interstellaire organische moleculen in de gas- en vaste fase geïntegreerd tot protostellaire schijven, waaruit zich planeten en kleinere lichamen vormen. Aanwas van stofdeeltjes in de schijf leidde tot de vorming van planetesimalen die met elkaar botsten waardoor planeten gevormd werden. In het binnenste, warmere deel van de zonnenevel klonterden rotsachtige planetesimalen samen om embryoplaneten ter grootte van de maan te vormen en uiteindelijk de aardse planeten. Verder weg van de zon, voorbij de zogenoemde sneeuwgrens, de afstand van de zon vanaf waar ijs kon condenseren, werden er uit de enorme hoeveelheden ruw materiaal vaste objecten met massa's van minimaal tien keer die van de aarde gevormd. Deze massa's waren groot genoeg om het omringende gas uit de zonnenevel in een te laten storten. Het bestaan van een sneeuwgrens verklaart op deze manier de ligging van de grote planeten in het buitenste deel van het zonnestelsel. Het overblijvende deel van de rotsachtige planetesimalen in het binnenste deel van de nevel heeft de asteroïden en meteorieten gevormd. In het buitenste deel van de nevel kwamen ijzige brokstukken voor, die nu bekend staan als Kuiper gordel objecten, kometen en Centaurs. De meeste asteroïden en kometen bevinden zich in stabiele banen (zoals de asteroïdengordel tussen Mars en Jupiter) of in reservoirs aan de buitenkant van ons zonnestelsel (zoals de Kuiper gordel) en daarbuiten (Oortwolk).

Onze kennis van de samenstelling van kleine hemellichamen komt voornamelijk van waarnemingen. Fragmenten zoals meteorieten en interplanetaire stofdeeltjes (IDPs) regenen echter voortdurend neer op aarde en vormen zo het enige buitenaardse materiaal dat in laboratoria kan worden onderzocht. Materiaal in kometen ouder dan de zon geeft informatie over de omstandigheden in de stervormingsschijf, zoals straling, temperatuur, dichtheid en turbulentie. Tijdens de vorming van de zonnenevel (de protoplanetaire schijf van ons zonnestelsel) onderging het originele interstellaire materiaal thermische en stralingsprocessen. De invloed van deze processen op het materiaal in de schijf is afhankelijk van de positie binnen de schijf. Daarnaast kan turbulentie in de schijf, een proces dat op dit moment nog niet volledig begrepen wordt, materiaal hebben verplaatst door het zonnestelsel heen. Gedurende de aanwas ondergaat invallend materiaal van de interstellaire wolk enorme druk- en temperatuurverschillen waardoor belangrijke ontwikkelingen kunnen plaatsvinden. Verder weg van de protozon werd het interstellair materiaal veel minder beïnvloed, omdat de dichtheid van de nevel en de schoksnelheden daar veel lager waren. In dit geval hield ontwikkeling simpelweg in, het door schokgolven sublimeren en recondenseren van ijs. Dichterbij de protozon leidden de hogere temperaturen en versterkte UV velden na de schok tot toenemende vijandige condities voor de overleving van interstellair ijs, gasvormige en vaste fase organische verbindingen en stofdeeltjes. Analytisch bewijs over de samenstelling en de isotopoverhoudingen van meteorieten en interplanetaire stofdeeltjes (IDPs) wekt echter de

suggestie dat sommige gasvormige interstellaire moleculen relatief onbeschadigd de nevel zijn binnengedrongen. [3].

Van een aantal organische moleculen is vastgesteld dat ze voorkomen in de coma van kometen, in atmosferen en op oppervlakken van planeten. Recentelijk is in het bijzonder de samenstelling van kometen herzien door uitgebreide waarnemingen van de helderste kometen van het de laatste tien jaar, Hale-Bopp en Hyakutake. Gevoelige technieken zijn gebruikt om de hoeveelheid organisch materiaal te meten in *carbonaceous chondrites* (koolstofhoudende meteorieten), die behoren tot de meest primitieve materialen in ons zonnestelsel. Het grootste koolstofaandeel in dit soort meteorieten behoort tot de groep grote organische moleculen. In het oplosbare gedeelte van deze monsters zijn meer dan 70 buitenaardse aminozuren geïdentificeerd, naast andere organische verbindingen zoals carboxylzuren, zwavelzuren, fosforzuren, alifatische en aromatische koolwaterstoffen en N-heterocycli.

Met de kennis van de samenstelling van kometen en meteorieten kunnen we een inventaris maken van materiaal dat van buitenaf zou kunnen zijn getransporteerd naar de vroege planeten [4]. De instroom van organische materiaal naar de aarde door kometen en asteroiden gedurende de periode van zware inslagen meer dan 3.8 miljard jaar geleden, kan wel zo groot zijn geweest als  $10^{11}$  kg/jaar. Dat is veel hoger dan de waarde van  $10^8$ - $10^{10}$  kg/jaar, een schatting van de aardse contributie gedurende dezelfde periode, aannemend dat de atmosfeer licht oxiderend was. Hoewel de instroom van IDPs het grootste deel van de koolstof naar de vroege planeten lijkt te hebben gebracht, kan de inslag van kometen even efficiënt zijn geweest.

Een andere belangrijke vraag is hoe de prebiotische verbindingen gedurende interplanetaire reizen en tijdens de inslag op de vroege aarde in tact zijn gebleven. Aminozuren en N-heterocycli, basiscomponenten van leven, zijn onstabiel onder thermische en stralingsinvloeden. Verschillende studies laten zien dat ze snel degraderen onder thermische invloed. Deze resultaten leveren het bewijs dat de voorlopers van leven beschermd moeten zijn geweest tegen straling en hitte gedurende hun tijd in de ruimte. Dit stelt belangrijke beperkingen aan hun vorming en overleving, en suggereert dat deze verbindingen zijn gevormd binnen in de "moederlichamen" van meteorieten, waar vloeibaar water aanwezig was, en dat de hitte en stralingscondities veel gunstiger waren gedurende hun transport naar de aarde en het binnenkomen van de atmosfeer.

### **De oorsprong van het leven**

Het ontstaan van leven is één van de moeilijkst te onderzoeken gebieden in de wetenschap. Recente ontwikkelingen en ontdekkingen in de chemie hebben geleid tot een aantal experimenteel testbare theorieën. Het wordt algemeen aangenomen dat het leven op aarde is ontstaan zodra de omstandigheden dat toe lieten. De periode waarin het leven is ontstaan, wordt aan de ene kant begrensd door inslagen van een dusdanige omvang en frequentie in de eerste 700 miljoen jaar van haar bestaan dat de gehele aarde daardoor gesteriliseerd werd. Dit is afgeleid uit inslagkraters op de maan die ongeveer vier miljard jaar of ouder zijn.

De andere kant van de ontstaansperiode wordt bepaald door insluitsels in een in Groenland gevonden steen, waarvan de leeftijd met behulp van koolstofisotopdatering op 3,8 miljard jaar is bepaald. Daarnaast zijn er de 3,5 miljard jaar oude Australische microfossiele afzettingen, hoewel er enige onenigheid bestaat over de biologische oorsprong van dit bewijs.

Sommige wetenschappers claimen dat de tijd tussen het ontstaan van leven en de opkomst van fotosynthetische bacteriën slechts tien miljoen jaar bedraagt. Dit is gebaseerd op experimenten die aantonen dat de meeste prebiotische syntheses op geologische tijdschaal snel verlopen en op laboratorium modellen die aantonen dat macromoleculen met grote katalytische activiteit snel gevormd kunnen worden uit een willekeurige verzameling monomeren, zoals bijvoorbeeld de in vitro evolutie van katalytisch RNA uit de nucleïnezuren monomeren.

De meeste theorieën aangaande het ontstaan van leven suggereren dat het leven is begonnen met een chemisch systeem dat zich op de één of andere manier ontwikkeld heeft tot een zichzelf in stand houdende entiteit. Een verklaring voor de aanwezigheid van deze organische, prebiotische moleculen is dus de eerste belangrijke stap op weg naar een compleet model over het ontstaan van leven. Er zijn in theorie drie belangrijke bronnen die de aanwezigheid van organische moleculen kunnen verklaren [5]. Ten eerste kunnen zij gevormd zijn via Miller-Urey-achtige synthese uit gereduceerde gassen in de atmosfeer met elektrische ontladingen, UV licht of andere vormen van hoog energetische straling als energiebron. Daarnaast kunnen prebiotische moleculen door middel van stofdeeltjes, kometen of zogenaamde *carbonaceous chondrites* (koolstofhoudende meteorieten) vanuit de ruimte op aarde terecht zijn gekomen. Tenslotte zijn er mogelijk prebiotische moleculen gevormd door op mineralen gekatalyseerde syntheses in en rond *hydrothermal vents* (heet water bronnen op de oceaانبodem) of via Fischer-Tropsch-achtige synthese.

Omdat er op dit moment weinig gegevens beschikbaar zijn over de atmosferische, oceanische en geologische toestand van de prebiologische aarde, is het onmogelijk om definitief te concluderen welke van deze bronnen de belangrijkste was. Elk van deze bronnen is experimenteel onderzocht op de vorming van moleculen uit de belangrijkste klassen van biologische bouwstenen, zoals purines, pyrimidines, aminozuren, membraanvormende stoffen en porphyrines. Zo heeft elke bron zijn voor- en nadelen wat betreft de produkten die er gevormd worden en de waarschijnlijkheid en efficiëntie waarmee ze gevormd worden.

Hoewel de synthese van kleine, monomere moleculen op een aannemelijke manier is aangetoond, moeten deze moleculen om leven te laten ontstaan in grotere structuren van hogere organisatie gerangschikt worden, waardoor ze katalytisch actief worden of gecodeerde informatie gaan bevatten. Oligomeren zoals oligonucleotiden of oligopeptiden, of aggregaten zoals *lipid vesicles*, hebben eigenschappen als katalytische activiteit of informatieopslag.

Naast de drie theorieën over de oorsprong van de prebiotische moleculen op aarde, zijn er drie concurrerende theorieën over de chemische evolutie van het leven. De eerste theorie is de “metabolisme eerst” theorie. Deze theorie gaat uit van een set gekatalyseerde reacties waaruit het leven is ontstaan. De “membraan eerst” theorie stelt dat de vorming van *lipid bilayers* het mogelijk maakte om membranen te maken waarmee energie gewonnen kon worden. Tenslotte wordt in de “gen eerst” theorie gesteld dat het ontstaan van leven onlosmakelijk verbonden is met het ontstaan van een manier om de informatie over katalytische activiteit door te geven.

De temperatuur waarbij het leven ontstaan is, blijft een heikel punt. Een hete aarde, tegen het kookpunt van water aan, is gesuggereerd als temperatuur waarbij het leven ontstaan is, maar ook het complete tegenovergestelde, een bevroren aarde. Een derde stroming zegt dat de aarde sinds het ontstaan van leven juist een gematigd klimaat kent, enkel onderbroken door enkele koudere periodes tijdens de verschillende ijstijden. Fylogenetische stambomen gebaseerd op rRNA laten zien dat de laatste gemeenschappelijke voorouder van alle moderne levende organismen waarschijnlijk een thermofiele bacterie is geweest. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het leven bij hoge temperaturen moet zijn ontstaan. Maar de hydrolytische instabiliteit van vele organische stoffen en de instabiliteit van de secundaire en tertiaire structuren van de meeste biomoleculen argumenteren juist voor het ontstaan van leven bij lage tot gematigde temperaturen. De conclusie dat de laatste gemeenschappelijke voorouder een mesofiele bacterie moet zijn geweest wordt ondersteund door metingen aan guanine en cytosine in het RNA.

In elke niche op aarde waar water aanwezig is, kunnen levende organismen aangetroffen worden, die vanwege de extreme omstandigheden waarbij ze gedijen extremofielen worden genoemd. Extremofielen komen onder andere voor in milieus variërend van pH 0,6 tot pH 12,5, bij temperaturen van -2 tot 115 °C, drukken tot 110 MPa en zoutgehaltes tot 37,5 % NaCl [6]. Hoewel hieruit geconcludeerd zou kunnen worden dat het leven in een brede verscheidenheid aan milieus kan zijn ontstaan, moet in gedachte worden gehouden dat extremofielen hoog

geëvolueerde organismen zijn. Zij laten ons eerder het onvoorstelbare aanpassingsvermogen van het leven zien, dan dat zij ons iets vertellen over de condities waaronder het leven is ontstaan.

Er zijn in principe twee manieren om naar het ontstaan van leven te kijken, de zogenaamde *top down* methode en de *bottom up* methode. De *bottom up* methode kijkt naar de moleculen die op de primitieve aarde aanwezig waren en hoe die samen zijn gevoegd tot grotere, replicerende en katalytische structuren onder plausibele geochemische condities. Deze methode is moeizaam toepasbaar vanwege de eerder genoemde onzekerheden in de omstandigheden op de primitieve aarde. De *top down* methode probeert met behulp van moderne biochemische en moleculair biologische technieken de meest fundamentele eigenschappen van een levende cel te deduceren, zonder welke leven niet zou kunnen bestaan.

De resultaten van het *top down* onderzoek wordt door de verschillende theorieën van het ontstaan van leven gebruikt als bewijs. Zo kan aangetoond worden dat er zonder membranen geen energietransductie plaats vindt. Evenzogoed kan worden aangetoond dat enzym-katalyse essentieel is om significant metabolisme te laten plaatsvinden. Of dat nucleïnezuren de *sine qua non* van het leven zijn.

Erkenning van de centrale rol die RNA speelt in de eiwit-biosynthese en genetische informatieoverdracht, de ontdekking van katalytisch RNA en moleculaire fossielen hebben het concept RNA-wereld vorm gegeven [7]. De RNA-wereld is een periode waarin RNA tegelijk functioneerde als katalysator en informatiedrager. Later werd gecodeerde eiwitsynthese ontwikkeld, waarbij katalytische taken werden overgenomen door eiwitten en het stabielere DNA molecule de taak van informatiedrager kreeg.

Het merendeel van de experimentele resultaten lijkt in de richting van deze “gen eerst” theorie te wijzen, hoewel hier enige experimentele bevooroordeeldheid kan bestaan. Het blijkt echter moeilijk te zijn RNA te vormen in prebiotische syntheses en ook de stabiliteit van RNA speelt de “gen eerst” theorie parten. Daarom is er een variant ontwikkelt die suggereert dat er een meer robuuste polymeer bestond die RNA voor ging. Ondanks veel speculaties over de aard van deze polymeer, hebben recente experimenten aangetoond dat RNA en DNA niet uniek zijn in hun capaciteit als informatiedrager.

Een fundamentele eigenschap van leven is de chiraliteit van de meeste bouwstenen. In de natuur komen een groot aantal moleculen voor waarvan het spiegelbeeld niet hetzelfde is als het origineel, vergelijkbaar met de linker en rechter hand. Hoewel die er hetzelfde uitzien, kun je ze niet over elkaar heen leggen. Twee niet-identieke spiegelbeeldmoleculen worden chirale moleculen genoemd. Het leven blijkt een voorkeur te hebben voor één van de twee chirale moleculen. Zo gebruiken alle levende organismen op aarde uitsluitend linksdraaiende aminozuren.

Verschillende theorieën zijn opgesteld om de oorsprong van deze voorkeur te verklaren. De meeste theorieën zijn gebaseerd op een chemisch amplificatieschema, maar ze verschillen in de aard van het initiële te versterken verschil: willekeurige fluctuaties, elektrozwakke interactie, of buitenaardse invloeden. Een niet-racemische verhouding, waarbij één van de twee spiegelbeelden meer aanwezig is, is tot nog toe alleen gevonden in meteorieten.

Twee belangrijke hindernissen moeten nog genomen worden voordat we de chemische oorsprong van het leven kunnen begrijpen. De eerste is de aard van de eerste katalysator, de tweede is de manier waarop deze katalysator zich organiseerde in polymeren van voldoende lengte om een driedimensionale structuur te vormen die in staat is een katalytische *active site* te vormen. Voortschrijdende kennis in gestuurde evolutie en membraanbiofysica maken de synthese van simpele, levende cellen een reëel voorstelbaar doel, zo niet een toekomstige werkelijkheid [8].

## Leven buiten de aarde

De mensheid kijkt al eeuwen naar de sterren en planeten aan het firmament. Eén van de fundamentele vragen daarbij is altijd geweest of er leven is buiten de aarde.

Het leven op aarde begon binnen 1 miljard jaar nadat de aarde werd gevormd. Sterren met een kleine massa ( $\leq 2$  zonmassa's) hebben een belangrijk tijdsvoordeel om planetaire systemen te vormen, omdat ze een lange stabiele periode van ongeveer 10 miljard jaar kennen gedurende de evolutie van de ster. Hoe zwaarder de ster, des te sneller verloopt de stellaire evolutie en dus kan er geen lange termijn ontwikkeling van leven plaats vinden.

Zou het zo kunnen zijn dat de configuratie van de planeten in ons zonnestelsel extreem weinig voorkomt, of zelfs uniek is? Factoren zoals de juiste afstand tot de ster, de juiste massa van de centrale ster, een stabiele planetaire baan, een Jupiterachtige planeet in de buurt, de juiste planetaire massa en de aanwezigheid van plattectoniek of een oceaan zijn factoren die mogelijk hebben bijgedragen aan het ontstaan van leven op aarde.

Tot één van de belangrijkste ontdekkingen van het laatste decennium hoort de detectie van meer dan 100 exoplaneten (planeten die om een andere ster dan de zon draaien). Deze planeten zijn stuk voor stuk giganten, de meeste zwaarder dan Jupiter. Afgezien van het feit dat de inclinatie van de baan onbekend is, zijn er nu ook planeten gevonden met een massa gelijk aan die van Saturnus. De meest verrassende eigenschap van deze recent ontdekte planeten is de korte afstand tot de centrale ster: in plaats van een baan buiten de zogenaamde sneeuwgrens, bevinden alle planeten die tot nu toe ontdekt zijn zich op een afstand van minder dan 4,5 AU van de ster (zie [www.exoplanets.org](http://www.exoplanets.org) of [cfa-www.harvard.edu/planets/encycl.html](http://cfa-www.harvard.edu/planets/encycl.html)).

Modellen die voorspellingen doen over deze recentelijk ontdekte planeetsystemen, laten zien dat er getijdenkrachten werken tussen de reuzenplaneet en de stofschijf, die eveneens om de ster draait. Daarbij migreert de reuzenplaneet richting de ster, met als gevolg dat ook kleinere planeten de ster in worden geduwd. Hiermee wordt gesuggereerd dat aardeachtige planeten niet kunnen voorkomen in zulke planeetsystemen, omdat ze de ster in worden geduwd.

Het is echter voorbarig om zulke speculatieve scenario's voor te stellen, terwijl er nog zo weinig bekend is over deze planetaire systemen. Overigens moet eraan toegevoegd worden dat het met de huidige stand van de techniek niet mogelijk is om andere dan de zware planeten op korte afstand van hun ster te detecteren. De planetaire systemen waar we eigenlijk naar op zoek zijn, zijn dus gebonden aan een observationele beperkingen. De eerste exoplaneet is ontdekt in 1995 [9], dus we zullen nog enkele jaren moeten wachten voordat we statistisch betrouwbare data hebben van planeten met een 12-jarige periode en een kleine eccentriciteit. Voor het ontdekken van planeten die op de aarde lijken, zullen we moeten wachten op gespecialiseerde telescopen die buiten de dampkring om de aarde draaien.

De ultieme detectie van leven zoals wij het kennen, zal waarschijnlijk zijn op een planeet die lijkt op de aarde. Hoe ziet een tweede aarde eruit? Ten eerste zijn we op zoek naar een rotsachtige planeet met vloeibaar water op of onder het oppervlak. Daarvoor is een nagenoeg cirkelvormige baan om een ster als de zon nodig, zodat de planeet een gelijkmatige verwarming door het jaar heen kent. Afwijkingen in deze baan zijn natuurlijk mogelijk, zolang de eccentriciteit maar niet zo groot is dat het water aan de ene kant van de planeet bevriest en aan de andere kant van de planeet kookt. Ook de afstand van de planeet tot de centrale ster is van groot belang voor de oppervlaktetemperatuur van die planeet. Venus staat bijvoorbeeld slechts 25% dichterbij de zon dan de aarde, maar op Venus is geen vloeibaar water. Op planeten die verder weg staan dan Mars zou het aanwezige water het hele jaar door volledig bevroren zijn. Op een planeet als Venus spelen ook een op hol geslagen broeikas effect en de fotodissociatie van watermoleculen in de atmosfeer mee in de verklaring voor het ontbreken van vloeibaar water.



In ons zonnestelsel zijn drie interessante objecten die nader worden onderzocht op de aanwezigheid van leven, sporen van uitgestorven leven of de mogelijkheid om er eens leven te herbergen. De maan Europa rond de planeet Jupiter heeft een kilometers dikke ijslaag, waaronder zich mogelijk een vloeibare oceaan bevindt. Die oceaan zou een oersoep kunnen bevatten zoals waarschijnlijk ook op de jonge aarde aanwezig geweest is, of zelfs levende organismen.

Daarnaast wordt er met interesse gekeken naar Titan, de grootste maan rond Saturnus, die mogelijk een grote -zij het een koude- prebiotische chemische fabriek is. De lijst met organische moleculen die op Titan zijn gevormd, kunnen ons een blik gunnen op de enorme moleculaire complexiteit die abiotische reacties over langere tijd kunnen genereren. Wanneer de Cassini ruimtevluiter in 2004 bij Titan aan komt, zal de Huygens sonde door de atmosfeer van Titan afdalen en op het oppervlak landen. Op die manier hoopt men meer te weten te komen over de chemische reacties op Titan.

De bekendste object in ons zonnestelsel waar al lange tijd naar tekenen van aanwezig of uitgestorven leven wordt gezocht is onze buurplaneet Mars. De atmosfeer van Mars bestaat tegenwoordig grotendeels uit koolstofdioxide (95.3%), stikstof (2.7%) en argon (1.6%). De atmosferische druk is er minder dan een honderdste van de druk op aarde op zeeniveau. Die lage druk zorgt ervoor dat er geen vloeibaar water aanwezig is op het oppervlak - water verdampt of vriest weg. Foto's van verschillende Marsmissies laten echter zien dat er in het verleden iets vloeibaars moet hebben gestroomd, vrijwel zeker water. Water, een belangrijke ingrediënt van het leven op aarde, lijkt nu in de vorm van ijs in de bodem van Mars voor te komen. Aanwijzingen van geologische gegevens, meteorieten en klimaatmodellen suggereren dat Mars in het verleden een klimaat heeft gehad waarin leven zich ontwikkeld zouden kunnen hebben. De combinatie van UV straling van de zon, extreme droogte en een vermoedelijk oxiderende toestand van de bodem lijkt het overleven van levende organismen in de regolith van Mars te verhinderen. De zoektocht naar organische moleculen en sporen van leven op Mars is al enkele decennia aan de gang. In 1976 zijn de twee Viking missies naar de rode planeet gestuurd, die naar tekenen van leven moesten zoeken. Ze hebben echter geen sporen van leven op het oppervlak van Mars gevonden.

De zoektocht naar sporen van aanwezig of uitgestorven leven is één van hoofddoelen van de ruimtemissies naar de rode planeet in de komende tien jaar. In juni 2003 zijn Europese Mars Express en de twee Mars Exploration Rovers van de VS gelanceerd.

### **Samenvatting**

Toekomstig onderzoek naar de oorsprong van het leven is veelbelovend, vooral omdat Astrobiologie een interdisciplinair onderzoeksgebied is. Binnen de Astrobiologie zal worden gezocht naar een coherent beeld van de condities en de processen die plaats vonden op de jonge aarde.

Het leven zoals we dat kennen heeft nodig:

- water,
- energie,
- organische moleculen,
- een informatie en een reproductiemechanisme.

Er zijn verschillende definities van leven, maar de belangrijkste eigenschappen zijn

- metabolisme,
- reproductie,
- evolutie door interactie met de omgeving

De belangrijkste stappen in het ontstaan van het leven zijn

het ontstaan van biomoleculen,  
het ontstaan van georganiseerde moleculaire systemen,  
het ontstaan van zelfreplicerende systemen,  
natuurlijke selectie.

De succesvolle ontwikkeling van het leven op aarde kan afhankelijk zijn geweest van de nauwe marge waarin een groot aantal parameters zich allen op het juiste moment in de juiste toestand bevonden. Een korte greep uit de lange lijst van die parameters:

milde oppervlakte temperatuur,  
de beschermende magnetosfeer,  
de aanwezigheid van vloeibaar water,  
de aanwezigheid van de juiste chemische bouwstoffen.

Uiteindelijk is de waarschijnlijkheid waarmee leven kan ontstaan onbekend. In de woorden van Francis Crick: “Het ontstaan van het leven lijkt bijna een wonder, zoveel condities zijn er waaraan voldaan moet worden om het op gang te krijgen.” Misschien is de visie van Wills en Bada (1999) toepasselijker: “Het leven zoals wij het kennen is assertief, veeleisend en niet tegen te houden.”

Enkele van de volgende vragen zijn nog onbeantwoord.

Wat zijn de reactiepaden om organische moleculen in de ruimte te vormen?

Waarnemingen gedaan aan stofdeeltjes en gerelateerde laboratorium studies aan koolstofhoudende stoffen zijn cruciaal om koolstofchemie in de ruimteomstandigheden te begrijpen en de samenstelling van kometen en asteroiden te bepalen.

Hoe makkelijk is het om leven te beginnen?

Het is moeilijk om een kwantitatief vast te stellen hoeveel organisch materiaal er in de atmosfeer van de primitieve aarde gevormd zou kunnen zijn. De rol van exogene depositie moet verder uitgezocht worden. Hierbij horen theoretische en experimentele studies naar de overlevingskansen van organisch materiaal bij inslag. Zelforganisatie en zelfrepliatie zijn nog steeds hiaten in onze kennis van de overgang van prebiotisch materiaal naar levend organisme.

Is er ergens anders nog leven?

De zoektocht naar exoplaneten en planetaire systemen zal doorgaan en kan een rol spelen in de detectie van planeten zoals de aarde, mochten er in de toekomst in de ruimte gestationeerde detectoren komen. Planetaire ontdekkingsreizen binnen ons zonnestelsel zullen waardevolle gegevens opleveren. Een bepaling van of er überhaupt leven op Mars was, en, indien dat het geval is, hoever dat leven zich ontwikkeld heeft was, is van fundamenteel belang. Een dergelijke bepaling kan duidelijk maken binnen welke *window of opportunity* leven zich kan ontwikkelen en welke processen van planetaire evolutie er zijn opgetreden op de warme, natte en tectonisch actieve aarde.

Het zoeken naar antwoorden op deze vragen wordt mogelijk door interdisciplinaire studies die gebruik maken van de nieuwste innovatieve technieken, zoals nanotechnologie, biosensoren en combinatoriële chemie. Een interdisciplinaire aanpak in deze context is van belang bij het oplossen van de meest basale vragen over het ontstaan van leven, de plaats van de mensheid in het universum en de waarschijnlijkheid van het bestaan van buitenaards leven.

Inzicht in de beperkingen, opgelegd door de verschillende wetenschappelijke disciplines, is essentieel bij het definiëren van de “ruwe materialen” van het leven [10]. Dit is van belang bij het beschrijven van het proces van zelforganisatie waarbij de relatie tussen replicerende polymeren, energierijke verbindingen en membraanvormende moleculen gevormd werd, wat uiteindelijk heeft geleid tot de eerste cellen. Het leven op aarde is één van de resultaten van het ontstaan en de evolutie van ons zonnestelsel. De grote variëteit aan organische verbindingen die in meteorieten gevonden is, doet vermoeden dat de basale bouwstenen van het aardse leven wijdverbreid in het Melkwegstelsel en andere sterrenstelsels voor moeten komen.

De stap van prebiotische materie naar leven, op aarde en misschien daarbuiten, is nog steeds verborgen in de mist van tijd en ruimte. Door die mist heen dringen is één van de grote avonturen van de wetenschap. Aan enthousiasme zal in ieder geval zeker geen gebrek zijn.

### Referenties

- [1] Bada, J. and Lazcano, A. Some like it hot, but not the first biomolecules. *Science* 296, 1982-1983, 2002.
- [2] Ehrenfreund, P. and Charnley, S.B. Organic molecules in the interstellar medium, comets and meteorites: A voyage from dark clouds to the early Earth. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 38, 427-483, 2000.
- [3] Botta, O. and Bada, J. Extraterrestrial Organic Compounds in Meteorites, *Surveys in Geophysics* 23, 411-467, 2002.
- [4] Chyba, C.F., Thomas, P.J., Brookshaw, L. and Sagan, C. Cometary Delivery of Organic Molecules to the Early Earth. *Science* 249, 366-373, 1990.
- [5] Deamer, D.W. and Fleischaker, G.W. *Origins of Life: The Central Concepts*. Bartlett and Jones, Boston 1994.
- [6] Cavicchioli, R. Extremophiles and the search for extraterrestrial life. *Astrobiology* 2, 281-292, 2002.
- [7] Schwartz, A.W. The RNA World and its origins, *Planetary and Space Science* 43, 161-165, 1995.
- [8] Szostak, J.W., Bartel, D.P., and Luisi, P.L. Synthesizing Life. *Nature*. 409, 387-390, 2001.
- [9] Mayor, M. and Queloz, D. A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star. *Nature* 378, 355-358, 1995.
- [10] Ehrenfreund, P., et al. Astrophysical and astrochemical insights into the origin of life, *Rep. Prog. Phys.*, Vol. 65, 1427-1487, 2002.