

Van cosmochemie via astrochemie naar astrobiologie

Door de groeiende aanname dat er leven is buiten de aarde ontwikkelen zich nieuwe vakgebieden. Cosmochemie, astrochemie en astrobiologie brengen deskundigen samen op het gebied van de astronomie, planetaire studies, aardwetenschappen, chemie, fysica, microbiologie en genetica. Alle drie leggen zij op eigen wijze de bouwsteen van alles, sterrenstof, onder de loep.

Zo'n veertig jaar geleden zong Joni Mitchell 'We are stardust... We are million year old carbon' op het Big Sur Folk Festival. Een jaar na Woodstock beschrijft zij in deze song het gevoel van verbondenheid van een generatie die Eden gevonden dacht te hebben; die sfeer is ook duidelijk wanneer ik de beelden van het festival nu terugzie. In hun coverversie benadrukten Crosby, Stills, Nash en Young deze verbondenheid nog door het veelvuldig herhalen van 'We are billion year old carbon'. Deze artiesten hebben natuurlijk gelijk: wij zijn op het meest elementaire niveau één: wij zijn allemaal de nazaten van sterrenstof; een tussenstap in de levensdans van de elementen in het heelal. De koolstof in ons lichaam, de zuurstof die we inademen, het titanium in de MacBook waar ik deze bijdrage op schrijf; al deze elementen zijn miljarden jaren geleden - ver voor ons zonnestelsel vaste vorm aannam - gevormd door nucleosynthetische processen, die plaatsvinden diep in het inwendige van sterren. In de decennia sinds Woodstock hebben we grote vooruitgang geboekt in het begrijpen van de levenscyclus van de elementen, niet in het minst omdat we echt sterrenstof gevonden hebben: diep verborgen in buitenaardse stenen, meteorieten, die op ons neergeregend zijn. Deze versteende stukken ster zijn ontstaan in de laatste stuiptrekkingen van sterren die aan het eind van hun levenspad het merendeel van hun materiaal teruggaven aan de Melkweg, verrijkt met zware elementen die diep in hun inwendige gemaakt zijn. Dit sterrenstof heeft een gekweld verleden achter zich in de Melkweg: bestraald door energetische fotonen, gebombardeerd door hete gassen in supernovaschokken, doorregen met energetische kosmische stralingsdeeltjes hebben deze stofkorrels toch hun identiteit niet verloren. Hoewel hun moedersterren al lang verdwenen zijn in de duistere vergetelheid van het heelal, staan de eigenschappen van deze sterren evenals hun gefolterde gang door de ruimte in het sterrengruis gebeiteld. De laatste dertig jaar hebben we geleerd dat dit verleden fragmentarisch beschikbaar is en gelezen kan worden met behulp van gevoelige laboratoriumtechnieken. Dit onderzoek aan sterrenstof benadrukt de grote verbondenheid tussen ons en het heelal en heeft tevens geleid tot een vruchtbare kruisbestuiving tussen een aantal onderling sterk verschillende wetenschappelijke disciplines.

'WIJ ZIJN OP HET MEEST ELEMENTAIRE NIVEAU ÉÉN: WIJ ZIJN ALLEMAAL DE NAZATEN VAN STERRENSTOF; EEN TUSSENSTAP IN DE LEVENSDANS VAN DE ELEMENTEN IN HET HEELAL.'

De studie van dit sterrenstof is onderdeel van de cosmochemie. In de jaren vijftig van de vorige eeuw bedacht de Nobelprijswinnaar Harold Urey de term 'cosmochemie' om de geochemie van planeten en andere onderdelen van ons zonnestelsel mee aan te duiden. In algemene zin is het doel van de cosmochemie om de oorsprong van elementen en de processen die een rol hebben gespeeld in hun evolutie te begrijpen. Meer specifiek ligt de nadruk hierbij op de minerale samenstelling en textuur en de minerale samenhang van planeten, manen, asteroiden en vooral natuurlijk van de gesteentes die afkomstig zijn van deze hemellichamen. Daarnaast richt cosmochemisch onderzoek zich op isotopische compositie en op leeftijden, zoals die afgeleid kunnen worden uit radioactieve elementen en bestraling in de ruimte. Zoals deze omschrijving al aangeeft, zag Urey de cosmochemie als een verlengstuk van de geochemie en veel van de analytische technieken die gebruikt worden om deze gesteentes te onderzoeken, komen uit de geochemie voort. Deze technieken moesten wel verfijnd worden om met kleine hoeveelheden materiaal te kunnen werken.

Aan het eind van de jaren zestig kreeg de cosmochemie een geweldige impuls doordat NASA zich opmaakte voor de Apollo-missies naar de maan. NASA steunde vanwege die missies de ontwikkeling van innovatieve laboratoriumtechnieken die de te verzamelen kleine hoeveelheden maanstenen - zo'n driehonderd kilogram - efficiënt zouden kunnen onderzoeken. In 1969 sloegen er twee grote meteorieten in - de Allende-meteoriet bij het plaatsje Allende in Mexico en de Murchison-meteoriet bij Murchison in Australië - en dat bood een uitgelezen kans om de nieuwe technieken ook toe te passen op dit buitenaards materiaal. Sindsdien heeft dit soort onderzoek een hoge vlucht genomen en veel nieuwe inzichten opgeleverd met betrekking tot de oorsprong en vroege evolutie van ons planetenstelsel. Twee aspecten wil ik er voor dit verhaal uitlichten.

In de eerste plaats was het al snel duidelijk dat, hoewel meteorieten op grote schaal heel homogeen zijn in de concentratie van de elementen, zij op kleinere schaal grote variaties vertonen in hun isotoopsamenstelling. Met name variaties in de concentratie van edelgassen (neon, argon, krypton en xenon) zijn hierbij interessant, omdat zij normaal gesproken - bijvoorbeeld in de warme nevel waaruit de planeten ontstonden - niet uitcondenseren. Hun aanwezigheid duidt daarom op exotische 'brokstukken'. In het laboratorium komen deze edelgassen vrij bij heel specifieke temperaturen wanneer een meteoriet of delen daarvan stapsgewijs verhit worden. De hoge temperaturen geven al aan dat deze edelgassen opgesloten waren in heel resistente materialen. Door nu in steeds wisselende stappen systematisch

nieuwe delen van de meteoriet te isoleren en die te concentreren met behulp van bijvoorbeeld verschillende zuurbehandelingen, wisten Ed Anders en zijn collega's aan de Universiteit van Chicago het spoor van deze edelgassen te volgen. Deze speurtocht leidde uiteindelijk, aan het eind van de jaren tachtig van de vorige eeuw, tot de isolatie en identificatie van het sterrenstof dat door Joni Mitchell bezongen is (zie Lewis et al. 1987). Het eerste sterrenstof dat op deze wijze is gevonden, zijn nanodiamanten met een typische afmeting van zo'n 10 nanometer - ongeveer duizend koolstofatomen. Deze nanodiamanten bevatten minieme sporen van xenon met een isotoopsamenstelling die karakteristiek is voor nucleosynthese in supernova-condities. Let wel: slechts een op de miljoen diamanten bevat een xenonatoom, dus het is een miniem spoor. Ed Anders heeft werkelijk spoorwerk verricht waarvoor Sherlock Holmes zich niet zou hebben geschaamd.

'HOEWEL HUN MOEDERSTERREN AL LANG VERDWENEN ZIJN IN DE DUISTERE VERGETELHEID VAN HET HEELAL, STAAN DE EIGENSCHAPPEN VAN DEZE STERREN EVENALS HUN GEFOLTERDE GANG DOOR DE RUIMTE IN HET STERRENGRUIS GEBEITELD.'

Sinds deze eerste isolatie en identificatie zijn er veel verschillende materialen van sterrenstof gevonden, waaronder diverse soorten carbides, grafiet, aluminiumoxides, titaanoxides en verschillende magnesiumsilicaten. De typische afmetingen van deze sterrenstoffen zijn wel wat groter - zo'n 0.1 tot 10 micrometer - dan die van de nanodiamanten. De eerste studies, waarbij zuurbehandelingen toegepast werden, resulteerden in de isolatie van met name koolstofmaterialen: in feite omdat ze zeer zuurbestendig zijn. Maar deze methode had wel als nadeel dat zo'n 99,9% van de meteoriet werd weggegooid. Meteorieten bestaan voornamelijk uit oxide en silicaatgesteentes en de zoektechniek is gebaseerd op het systematisch verwijderen van deze materialen. Sterrenstof van oxide en silicaat was daarom veel moeilijker op te sporen; dat lukte pas dankzij de ontwikkeling van de nano-SIMS *Secondary Ion Mass Spectrometry* op nanometerschaal). Bij deze techniek wordt een heel fijne bundel van energetische ionen (met een doorsnede van 100 tot 500 nanometer) gebruikt om atomen uit een monster te slaan en te ioniseren. De resulterende ionen worden dan met behulp van een massaspectrometer gedetecteerd. Op deze wijze kan men op heel kleine schaal individuele sterrenstofkorrels in een meteoriet opsporen door naar korrels te zoeken met isotoopverhoudingen - met name van zuurstof - die karakteristiek zijn voor hun moedersterren (en flink afwijken van de zonnestelselwaarde). Vele andere technieken zijn vervolgens beschikbaar om deze korrels te bestuderen, zodat hun samenstelling, hun mineraalstructuur en hun relatie met de omringende materialen kunnen worden bepaald. Naast de oorsprong en vroege evolutie van het zonnestelsel, heeft de bestudering van dit sterrenstof ook veel kennis opgeleverd van de nucleaire processen in het inwendige van sterren die ten grondslag liggen aan de elementen en aan de verrijking van de Melkweg met zware elementen. Het zonnestelsel is ontstaan uit de as van zo'n honderd miljoen sterren van een eerdere generatie; elk van de geanalyseerde sterrenstofjes is afkomstig van een andere ster. Gezamenlijk vormen ze een momentopname van de samenstelling van het materiaal in de Melkweg waaruit 4,6 miljard jaar geleden het zonnestelsel gevormd werd, en van de processen die daarbij een rol speelden. Tegelijkertijd stimuleerde dit onderzoek de ontwikkeling van geavanceerde technieken die steeds kleinere steentjes op de korrel konden nemen. Praten we bij de Allende- en Murchison-meteorieten nog over zo'n drie ton aan materiaal, NASA's recente *stardust mission* kwam, na een bezoek aan de komeet Wild 2, terug met niet meer dan ongeveer 1 microgram aan kometenmateriaal voor onderzoek in aardse laboratoria. En de Japanse Hayabusa-missie, die de asteroïde Itokawa bezocht, verzamelde slechts een duizendtal minieme stofdeeltjes voor onderzoek op aarde. *Sample return*-missies - naar asteroïden, kometen, manen en Mars - zullen in de toekomst een grote rol spelen in het onderzoek naar het ontstaan en de evolutie van het zonnestelsel; de ontwikkeling van deze nieuwe technieken maakt dit onderzoek mogelijk.

Het tweede punt dat ik eruit wil lichten voor dit verhaal is het onderzoek van organisch materiaal, dat een grote vlucht heeft genomen dankzij de Murchison- en Allende-meteorieten. Alhoewel al zo'n tweehonderd jaar bekend is dat er koolstof in dit soort meteorieten zit, was er vóór de inslag van deze twee meteorieten aanvankelijk heel weinig onderzoek naar de aard van dit koolstofrijke materiaal gedaan. Murchison en Allende behoren tot de klasse van de koolstof-chondrieten en bestaan voor een groot deel uit glas'druppels' - de chondrulen - die op hoge temperatuur - zo'n 1500 graden boven nul - gevormd zijn door snelle afkoeling en stolling van gesmolten stofdeeltjes. Deze chondrieten, met een typische afmeting van 1 millimeter, zitten in een veel primitievere matrix van zeer kleine stofdeeltjes en organisch materiaal, dat veelal niet aan zulke hoge temperaturen is blootgesteld. Een groot deel van dit organische materiaal heeft de vorm van 'macromoleculen', met een structuur die wel met aards kerogeen vergeleken wordt - het moedermateriaal van aardolie en aardgas. Daarnaast bevatten met name de meest primitieve koolstof-chondrieten ook nog kleinere moleculen, die er met chemische oplosmiddelen uitgehaald kunnen worden voor detailstudies met standaard chemische technieken. Dit onderzoek leverde al direct grote verrassingen op. De meteorieten bevatten een groot aantal organische verbindingen, zoals alifatische en aromatische koolwaterstoffen, carbonzuren, amines en amides. Het meest verrassend was natuurlijk de ontdekking van een rijke verzameling van meer dan zeventig aminozuren. Deze grote verscheidenheid en hun stereochemische en isotoopkarakteristieken bewijzen dat deze aminozuren buitenaards en abiologisch zijn. De asteroïden waar deze meteorieten vandaan komen, kennen dus een heel rijke organische chemie.

'SAMPLE RETURN-MISSIES - NAAR ASTEROÏDEN, KOMETEN, MANEN EN MARS -

ZULLEN IN DE TOEKOMST EEN GROTE ROL SPELEN IN HET ONDERZOEK NAAR HET ONTSTAAN EN DE EVOLUTIE VAN HET ZONNESTELSEL.'

Een andere grote verrassing die uit dit onderzoek naar de organische samenstelling van de meteorieten naar voren kwam, was de aanwezigheid van een omvangrijke isotoopverrijking in deuterium. Dit soort verrijkingen duidt erop dat chemische processen bij zeer lage temperaturen – minstens 200 graden Celsius onder nul – een rol hebben gespeeld in hun vorming. Deze temperaturen zijn veel lager dan je zou verwachten in het gebied waar de meteorieten gevormd zouden zijn, en ook veel lager dan af te leiden viel uit de beschouwing van andere delen van de meteoriet, zoals de chondrulen. Astronomen meten ook grote deuteriumverrijkingen in het koude gas waaruit nieuwe sterren zich vormen en er werd dan ook snel een verband gepostuleerd: het organisch materiaal in de meteorieten is ontstaan uit moleculen die gevormd zijn in de ijzige omgeving van het diepe heelal. Dit moleculaire gas is – net als het sterrenstof – opgenomen in de nevel waaruit het zonnestelsel zich gevormd heeft, zonder volledig zijn identiteit te verliezen. Dit verbindt de organische samenstelling van het materiaal waaruit het zonnestelsel ontstaan is met de chemie van de koude ruimte ver voor de vorming van het zonnestelsel.

Terwijl dit verhaal zich afspeelde in de laboratoria van de cosmochemici, voltrok zich een andere stille revolutie op astronomisch terrein, in ons begrip van de chemie van de ruimte. Sinds de jaren zestig hebben astronomen zo'n honderdvijftig moleculen geïdentificeerd door veranderingen aan hun rotatie te meten. Dit soort veranderingen zijn heel molecuul-specifiek en door spectra uit de ruimte te vergelijken met laboratoriumspectra kan de aanwezigheid van specifieke moleculen aangetoond worden. Naast simpele moleculen als water, ammonia, methanol en formaldehyde, zijn dit voornamelijk moleculen die gebaseerd zijn op kleine onverzadigde koolstofketens. Dit soort simpele moleculen zijn geconcentreerd in grote wolken gas waaruit nieuwe sterren zich vormen; ze spelen een grote rol in dit vormingsproces. Daarnaast heeft infrarood-onderzoek de laatste twintig jaar aangetoond dat er ook zeer complexe moleculen – polycyclische aromatische koolwaterstoffen en ook *buckyballs* (moleculen bestaande uit zestig koolstofatomen gerangschikt in de vorm van een voetbal) – in melkwegstelsels rondzweven. Zo'n 10% van de koolstof in het heelal heeft de vorm van dit soort complexe moleculen! We leven dus duidelijk in een moleculair universum, waarbij chemie voor complexe vormen kan zorgen en een grote rol speelt in de evolutie.

In de astronomie is daarom een nieuwe interdisciplinaire tak tot bloei gekomen die een brug slaat naar de chemie: de astrochemie, die zich tot taak stelt om de chemie in de ruimte te bestuderen en de rol van moleculen in de evolutie van het heelal te begrijpen. Een belangrijke drijfveer hierbij is de wens de organische moleculen in kaart te brengen in gebieden van planeetvorming, met name in de *habitable zone*: het gebied in zonnestelsels dat niet te koud en niet te heet is, waar water in vloeibare vorm is en leven mogelijk zou zijn. In ons zonnestelsel is dat ruwweg het gebied van de aarde tot en met Mars. De astrochemie verbindt dus ook de astronomie met de biologie; er is tevens een overlap met de cosmochemie, in het bijzonder waar het de organische samenstelling van meteorieten en kometen betreft, en met de astrobiologie, als het gaat om de oorsprong van het leven.

Astrobiologie – of ook wel *exobiology*, zoals het vak oorspronkelijk gedoopt werd door Nobelprijswinnaar Joshua Lederberg – bestudeert de vorming, evolutie, en distributie van buitenaards leven. Omdat er geen buitenaards leven bekend is, is deze discipline ook wel lang de enige studie zonder studiemateriaal genoemd. Die sceptische houding is echter de laatste vijftien jaar volledig omgeslagen en van een onderwerp dat in wetenschappelijke kringen alleen maar een plaats had aan de borreltafel, is astrobiologie nu tot een echte, interdisciplinaire studierichting geëvolueerd. Bij deze omslag hebben drie ontwikkelingen een rol gespeeld. In de eerste plaats heeft in de astronomie een grote omwenteling plaatsgevonden. Volgens de onlangs aangekondigde eerste resultaten van NASA's Kepler-missie vermoedt men dat er nu zo'n 1700 planeten bestaan buiten ons zonnestelsel. Zo'n zestig van deze planeten lijken op de aarde; aan het eind van de Kepler-missie (die nog vele jaren zal duren) zal de teller naar verwachting op ongeveer tweehonderd staan. Van deze 1700 planeten bevinden zich er zo'n vijftig in de bewoonbare zone van hun ster, waarvan er circa vijf aardachtig zijn. Deze inventarisatie is bij lange na niet compleet maar het is nu al duidelijk dat planetenstelsels een normaal bijproduct zijn van stervorming en dat op veel planeten de omstandigheden voor leven gunstig zouden kunnen zijn.

'DEZE GROTE VERSCHIEDENHEID EN HUN STEREOCHEMISCHE EN ISOTOOPKARAKTERISTIEKEN BEWIJZEN DAT DEZE AMINOZUREN BUITENAARDS EN ABIOLOGISCH ZIJN.'

In de tweede plaats is het sinds de jaren tachtig binnen de biologie duidelijk geworden dat het leven op aarde zich kan aanpassen aan heel extreme omstandigheden: leven kan bloeien bij heel lage en bij heel hoge temperaturen, in heel zoute omgevingen en in heel zure, in uitgedroogde oorden en onder hoge straling. Extremofiele micro-organismen zijn overal en de bewoonbare zone in planeetstelsels is daarmee behoorlijk uitgebreid.

In de derde plaats heeft genoom-sequentieanalyse nieuw inzicht verschaft in Darwins *tree of life*: de historie en de onderlinge verbondenheid van organismen over evolutionaire tijdschalen. Cruciale informatie over de oorsprong van het leven ligt natuurlijk verborgen in de fossiele wortels van de *tree of life* maar deze microfossiele aantekeningen zijn niet gemakkelijk te lezen. De oudst bewaarde cellen dateren van zo'n 2,5 miljard jaar geleden en er zijn een aantal mogelijke, of misschien zelfs wel waarschijnlijke, aanwijzingen gevonden voor het bestaan van microbiële resten in rotsen die 3,5 miljard oud zijn. Dit laatste heeft tot grote opwinding geleid omdat de omstandigheden op de aarde pas kort

daarvoor geschikt werden voor het ontstaan van leven. Als er 3,5 miljard jaar geleden inderdaad al leven op aarde was, zou dat dus betekenen dat het ontstaan is vrijwel meteen toen het kon. Of misschien zelfs wel eerder, maar dan tussentijds is weggeveegd in de regen van meteoriet- en komeetinslagen die volgde op de migratie binnen ons zonnestelsel van Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus.

Alles bij elkaar heeft dit tot een aardverschuiving geleid in ons denken. Copernicus haalde de aarde uit het middelpunt van het heelal en Darwin maakte van de mens een schakel in de evolutie. Nu is het heersende paradigma dat we in een heelal leven waarin chemie en biologie even belangrijk zijn als de fysica en dit voedt de stelling dat het leven kruipt waar het niet gaan kan. Leven in het heelal is daarom waarschijnlijk overvloedig en overal aanwezig.

‘WE LEVEN DUS DUIDELIJK IN EEN MOLECULAIR UNIVERSUM, WAARBIJ CHEMIE
VOOR COMPLEXE VORMEN KAN ZORGEN EN EEN GROTE ROL SPEELT IN DE
EVOLUTIE.’

Deze verschuiving in ons denken wordt gevoed door een gestage stroom van informatie, afkomstig van NASA- en ESA-satellieten die naar alle uithoeken van het zonnestelsel gestuurd worden op zoek naar water, biomoleculen en leven. De planeet Mars speelt hierbij terecht een belangrijke rol. In de eerste miljard jaar van zijn bestaan - toen er misschien al leven ontstond op aarde - had Mars een oceaan en heersten er ook andere condities die leven zouden kunnen ondersteunen. Een van de belangrijke doelstellingen van de Huygens/Cassini-missie van ESA en NASA was om de chemie van de atmosfeer van de maan van Saturnus, Titan, te onderzoeken. In de atmosfeer en op het oppervlak van deze maan vindt een complexe organische chemie plaats, die weleens vergelijkbaar zou kunnen zijn met de prebiotische chemie op de vroege aarde. Er worden nu ook plannen ontwikkeld om een satelliet te sturen om de maan van de planeet Jupiter, Europa, te onderzoeken. Deze maan herbergt waarschijnlijk een wateroceaan onder zijn ijsoppervlak, waar leven wellicht mogelijk is.

Om deze missies in een ruimer kader te plaatsen ondersteunt NASA ook actief een breed onderzoeksprogramma in de astrobiologie, met vijftig miljoen dollar per jaar. Daarmee worden zo'n vijftien interdisciplinaire onderzoeksgroepen gefinancierd. Dit heeft wereldwijd navolging gevonden en in verschillende landen zijn inmiddels astrobiologische instituten opgericht. NWO heeft recentelijk een Nederlands Astrochemisch Netwerk opgericht dat, bouwend op de sterktes van het Nederlands chemisch en astronomisch onderzoek, een groot aantal instituten verbindt met een breed programma op het gebied van de astrochemie. Een Nederlands Astrobiologisch Instituut, dat dit netwerk zou aanvullen op het gebied van de oorsprong en vroege evolutie van leven in het heelal, zou een welkome uitbreiding zijn, met name als dat het onderzoek van planeten en exoplaneten aan de Nederlandse universiteiten zou versterken.

Deze veelheid aan activiteiten hebben in wetenschappelijke kringen tot een welhaast permanent ‘Woodstock’-gevoel geleid: een gevoel van grote verbondenheid tussen de disciplines. De drie nieuwe studierichtingen cosmochemie, astrochemie en astrobiologie brengen deskundigen samen op het gebied van de astronomie, planetaire studies, aardwetenschappen, chemie, fysica, microbiologie en genetica. Deze geleerden bestormen tezamen het laatste bolwerk van het pre-copernicaanse wereldbeeld. De aarde en het leven daarop hebben geen bijzondere positie in het heelal. Zulke interdisciplinaire studies worden helaas vaak geplaagd door een babylonische spraakverwarring. Elk van de disciplines heeft natuurlijk zijn eigen jargon, dat moeilijk te doorgronden is voor buitenstaanders. Daarnaast ontstaan er bijna automatisch turfgevechten, waarbij uitroepen zoals ‘NASA, laat de astrobiologie nu maar over aan de biologen’ schering en inslag zijn. Dat kan natuurlijk niet. Net als een cel leven deze drie nieuwe onderzoeksrichtingen dankzij symbiose op het meest elementaire niveau. En een interdisciplinaire benadering is met name van belang voor studenten die deze onderzoeksgebieden voor het eerst betreden.

De interdisciplinaire interactie die deze drie velden kenmerkt, stelt zware eisen aan een studieboek. In de vier hier geselecteerde boeken wordt op heel verschillende wijze met deze uitdaging omgegaan. *Cosmochemistry* van **McSween** en **Huss** en *Astrochemistry* van **Shaw** zijn klassieke studieboeken, geschreven door wetenschappers, meestal vanuit het oogpunt van hun eigen expertise. Deze aanpak heeft het voordeel dat de boeken een consistente stijl hebben en een grote interne samenhang vertonen. Maar de nadruk ligt voornamelijk op het gebied waarop de auteurs experts zijn; andere onderwerpen blijven onderbelicht. Vooral *Cosmochemistry* is een prachtig studieboek geworden, dat de minerale samenstelling en petrografie van meteorieten op heldere wijze uiteenzet. De taxonomie van meteorieten, de oorsprong van de elementen, de bepaling van hun abundantie in gesteentes en van de chronologie van meteorieten worden alle uitvoerig en gedetailleerd besproken. Ik moet wel toegeven dat bij lezing van dit sterrenstof mij onwillekeurig de verzuchting ontsnapte ‘ze weten wel een heleboel van heel weinig’. De samenvattende hoofdstukken over de chemie van het heelal, het ontstaan en de vroege evolutie van het zonnestelsel en de processen die daarbij een rol spelen, zijn duidelijk wat verder van het bed van de auteurs en blijven steken in ruwe schetsen.

‘HET IS NU AL DUIDELIJK DAT PLANETENSTELSELS EEN NORMAAL BIJPRODUCT ZIJN
VAN STERVORMING EN DAT OP VEEL PLANETEN DE OMSTANDIGHEDEN VOOR
LEVEN GUNSTIG Zouden KUNNEN ZIJN.’

In *Planetary Systems en Planets and Life* wordt het concept van een studieboek van een hele ander kant benaderd. De redacteurs van beide boeken brengen een groot aantal deskundigen samen, die ieder hun expertisegebied beschrijven en zo tezamen een breed beeld schilderen van deze gebieden. *Planetary*

Systems is gebaseerd op een tweetal workshops in Canada en de redacteurs hebben hun best gedaan om de onderlinge hoofdstukken zoveel mogelijk op elkaar af te stemmen. Het boek geeft een uitstekend overzicht van alle aspecten van de astrobiologie en vormt een prima basis voor een beginnerscollege over dit onderwerp. De student zal daarnaast toch ook wel andere literatuur moeten raadplegen voor de nodige diepgang. *Planets and Life* kan ik zonder reserves aanbevelen voor een college voor *graduate* studenten en als naslagwerk voor wetenschappers die actief zijn in een van de verschillende vakgebieden binnen de astrobiologie. De laatste jaren zijn er meer boeken verschenen over astrobiologie maar voor een student voor wie de speurtocht naar de oorsprong van het leven op aarde (of elders in het heelal) net aanvangt, is dit boek een prachtig startpunt. Voor de vermoeide wetenschapper die zoekt naar antwoorden in andere disciplines vormt dit boek een welkome startplaats voor een persoonlijke 'Woodstock'-ervaring.

Xander Tielens is hoogleraar Fysica en chemie van het interstellair medium aan de Universiteit Leiden.

Besproken boeken:

ASTROCHEMISTRY - FROM ASTRONOMY TO ASTROBIOLOGY

door **A.M. Shaw**

John Wiley & Sons. Hoboken, NJ 2006.

352 pag., € 47,95

COSMOCHEMISTRY

door **H.Y. McSween Jr. en G.R. Huss**

Cambridge University Press. Cambridge 2010.

568 pag.

€ 65,50

PLANETARY SYSTEMS AND THE ORIGINS OF LIFE

door **R. Pudritz, P. Higgs en J. Stone (red.)**

Cambridge University Press. Cambridge 2007.

334 pag., € 107,95

PLANETS AND LIFE - THE EMERGING SCIENCE OF ASTROBIOLOGY

door **W.T. Sullivan III en J.A. Baross (red.)**

Cambridge University Press. Cambridge 2007.

626 pag., € 65,50

Literatuur:

- R.S. Lewis et al. 'Interstellar Diamonds in Meteorites', *Nature* 326 (1987): 160-162.