

Oorsprong van sterren, planeten en

Ewine van Dishoeck*

Foto's van planeten buiten ons eigen zonnestelsel zijn nog niet gemaakt. Maar sinds een paar jaar hebben astronomen wel overtuigende indirecte aanwijzingen dat Jupiter-achtige planeten rond andere sterren cirkelen. Meer dan tachtig van deze 'exoplaneten' zijn inmiddels ontdekt. Hoe gewoon is het dat plane-
tensels ontstaan? Lijken ze op ons eigen zonnestelsel, of zijn ze juist heel anders? En welk deel van deze planeten zou bewoonbaar kunnen zijn? Dankzij nieuwe krachtige telescopen kunnen deze eeuwenoude vragen nu eindelijk uit het rijk van filosofische overwegingen en speculaties naar het domein van wetenschappelijk onderzoek worden getild. In dit artikel wordt een overzicht gegeven van de vorming van sterren en planeten uit de ijle materie die zich tussen de sterren bevindt en van de chemische processen die daarbij een rol spelen.

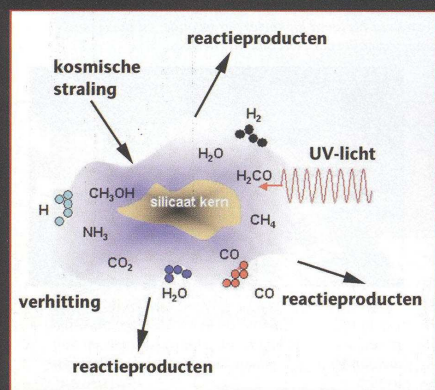
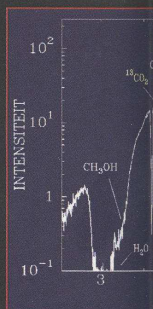
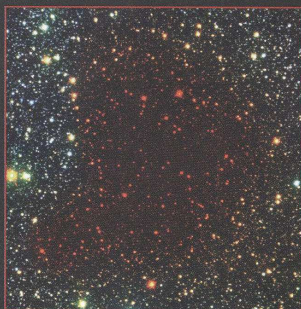
derdaad interstellair zijn, en niet bijvoorbeeld wazige melkwegstelsels of 'gaten in de hemel', is pas aan het begin van de 20ste eeuw duidelijk geworden (zie ook *Zenit*, juni 2000, blz. 252 e.v.). De donkere wolken zijn de dichtste en koudste concentraties van het interstellair gas, dat voor meer dan 90% uit waterstofmoleculen (H_2) bestaat. Daarnaast zijn er ook stofdeeltjes aanwezig, kleine 'zand'korreltjes ter grootte van een tienduizendste millimeter, die samen ongeveer 1% van de massa van de wolk bevatten. Dit stof maakt de wolken zo donker, doordat de deeltjes het licht van de achterliggende sterren blokkeren, net zoals smog op een warme zomerdag het zicht bemoeilijkt. We weten nu dat deze wolken van gas en stof door ons hele melkwegstelsel verspreid zijn en tezamen ongeveer 10% van de massa van de sterren bevatten. In dit artikel richten we ons op interstellair gas en stof dicht bij huis, binnen een paar honderd lichtjaar afstand van onze zon.

* Prof. dr. E. F. van Dishoeck is hoogleraar moleculaire astrofysica bij de Universiteit Leiden en houdt zich daar vooral bezig met de chemie van het gas in de ruimte tussen de sterren en de vorming van sterren en planeten. Haar homepage is te vinden op: <http://www.strw.leiden.univ.nl/~ewine/>.

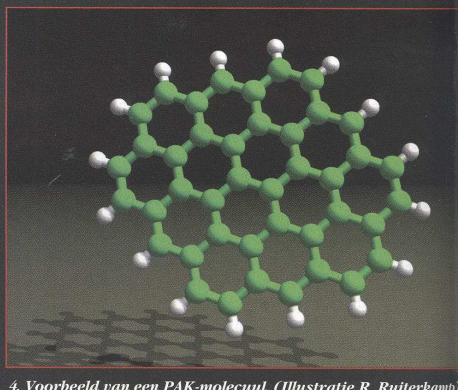
Nieuwe sterren ontstaan in wolken van gas en stof die zich tussen de sterren bevinden. Deze interstellair wolken verraden hun aanwezigheid op verschillende manieren. Eén van de bekendste voorbeelden van zo'n wolk is de lichtende gasnevel in het sterrenbeeld Orion. In het zwaard van de mythische jager Orion bevindt zich een zeer zware wolk,

met voldoende materiaal om een miljoen nieuwe sterren te vormen. Daarnaast zijn er ook donkere, pikzwarte plekken aan de hemel, die al door William Herschel ruim 200 jaar geleden zijn ontdekt (zie fig. 1). Herschel vermoedde reeds dat de Orionnevel en deze 'kolenzakken' de kraamkamers van nieuwe sterren zijn: 'the chaotic material of future Suns'. Dat deze nevels ook in-

1. Links: opname van de donkere wolk B68 met de ESO-VLT op zichtbare golflengten. De kleine stofdeeltjes in de wolk verduisteren het licht van de achterliggende sterren zodat de wolk zich als een 'kolenzak' tegen de melkweg aftekent. Rechts: Opname van dezelfde wolk in het infrarood, waarbij de extinctie van het stof kleiner is. De achterliggende sterren zijn nu door de wolk heen te zien. (Illustratie J. Alves et al. 2001/ESO).



3. Schets van een interstellair stofdeeltje, omgeven door een ijsmantel. De verschillende processen die de chemische samenstelling van de ijsen kunnen beïnvloeden zijn aangegeven. (Illustratie H. Fraser & D.A. Williams 2002).



4. Voorbeeld van een PAK-molecuul. (Illustratie R. Ruiterkamp)

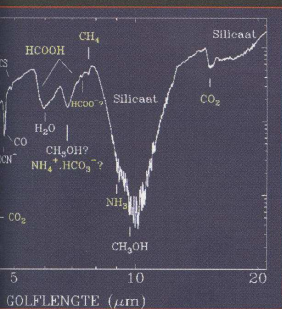
het leven

Chemische ingrediënten

De interstellaire wolken zijn voor zowel astronomen als chemici interessant. Ten eerste vormen ze een uniek chemisch laboratorium waarin de condities heel anders zijn dan gebruikelijk in een laboratorium op aarde. De wolken zijn niet alleen zeer koud, slechts tien graden boven het absolute nulpunt, maar ook heel ijl: slechts 10.000 deeltjes per kubieke centimeter. Ter vergelijking: een goed vacuüm in een laboratorium heeft een miljoen keer zo hoge dichtheid. Hoe kunnen onder deze koude en ijle omstandigheden twee deeltjes bij elkaar komen om een chemische binding te vormen? Iedere chemicus zou voorspellen dat er vrijwel geen moleculen in de ruimte zijn. Toch is in de afgelopen dertig jaar in deze donkere wolken een verrassend rijke chemie gevonden, met moleculen variërend van eenvoudige verbindingen zoals koolmonoxide (CO) tot complexe organische moleculen zoals dimethylether (CH_3OCH_3).

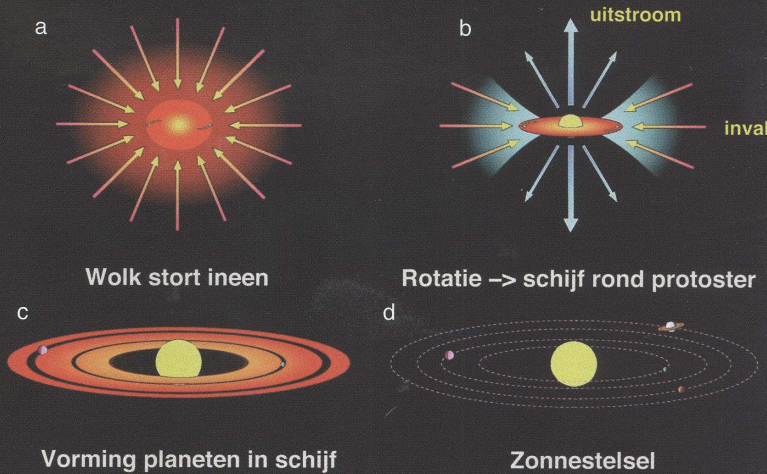
Meer dan 120 verschillende moleculen zijn inmiddels in de ruimte ontdekt. Ze kunnen éénduidig worden geïdentificeerd omdat ieder molecuul zijn eigen 'vingerafdruk' heeft: het molecuul kan straling absorberen of uitzenden op slechts een paar karakteristieke golflengten. Ruim driekwart van de moleculen zijn organische koolstofhoudende moleculen die ook op aarde te vinden zijn, zoals H_2CO (formaldehyde) en HCN (waterstofcyanide), terwijl slechts een kleine fractie anorganisch is, zoals H_2O (water) of SO_2 (zwaveldioxide). Er zijn ook meer exotische moleculen gevonden, die eerst in de ruimte zijn ontdekt voordat ze in een lab op aarde zijn gemaakt. Voorbeelden zijn ionen zoals HCO^+ en N_2H^+ , en lange koolstofketens zoals HC_nN . Daarnaast zijn er sterke aanwijzingen dat nog grotere moleculen zoals polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAKs) in grote hoeveelheden in de ruimte voorkomen (zie fig. 4). Benzeen (C_6H_6) – de eenvoudigste PAK – is onlangs in de schillen rond sterrende sterren ontdekt. De eerste interstellaire suiker – glycolaldehyde (CH_2OHCHO) – is recentelijk gevonden, maar interstellaire aminozu-

ren, die de bouwstenen van RNA en DNA zouden kunnen vormen, zijn nog niet aangetoond. In de binnenste, dichte delen van een wolk zijn de stofdeeltjes zo koud dat de gasfase moleculen er in korte tijd op kunnen condenseren en een ijslaagje vormen, vergelijkbaar met de ijsafzetting in een diepvriezer. Mede dankzij ISO – het Infrarode Space Observatory, een Europese satelliet die van 1995 tot 1998 met onder meer een Nederlands-Duits instrument waarnemingen in het infrarode deel van het spectrum heeft gedaan – kennen we nu de chemische samenstelling van de ijslaagjes (zie fig. 2 en 3). Waterijs komt het meest voor, maar de interstellaire ijscocktail bevat ook koolmonoxide (CO), kooldioxide (CO_2 , de 'prik' in de cocktail), methaan (CH_4) en zelfs methanol (CH_3OH), de eenvoudigste alcohol. In het Raymond & Beverly Sackler Laboratorium voor Astrofysica in Leiden worden deze omstandigheden nagebootst, zij het op veel kortere tijdschalen dan in de ruimte. Hoe al deze gasfase en vaste-fase moleculen ontstaan en wat er mee gebeurt tijdens de vorming van sterren is één van de hoofdoelen



2. Infraroodspectrum van de zware protoster W 33A binnenin een moleculaire wolk, opgenomen met de ISO-satelliet. Straling van het hete stof dichtbij de ster wordt geabsorbeerd door koelere stof met ijsmantels verder weg van de ster. Duidelijk te onderscheiden zijn absorptiebanden van een veelheid van ijscomponenten, alsmede twee absorpties die worden toegeschreven aan de rotsachtige stofkernen die bestaan uit silicaat. De m.b.v. ISO ontdekte ijsmoleculen zijn aangegeven in geel. (Illustratie E. Gibb et al. 2000).

Scenario voor ster- en planeetvorming



5. De verschillende stadia in de vorming van een lichte ster zoals onze zon. In het eerste stadium (a) trekken koude klonten in een moleculaire wolk zich langzaam samen. Vervolgens wordt een protoster gevormd met een roterende circumstellaire schijf. Al snel bierna ontwikkelt de jonge ster een bipolair massa-uitstroom die het omringende stof en gas weg blaast (b). Merk op dat de schaal van figuur (b) 1000 keer kleiner is dan van figuur (a). Ten slotte blijft een zichtbare nieuwe ster over die nog omgeven is door de protoplanetaire schijf (c). Uit deze schijf kunnen nieuwe planeten en kometen zoals in ons eigen zonnestelsel worden gevormd (d). (Illustratie M. McCaughrean).

van astrochemisch onderzoek; ze vormen immers het ruwe materiaal waarvan nieuwe planetenstelsels worden gemaakt.

Draaiboek voor stervorming

Donkere wolken zijn met zichtbaar licht alleen waar te nemen als silhouetten tegen een oplichtende achtergrond. Om in de wolken door te kunnen dringen en te ontdekken wat zich daarin afspeelt moeten we een andere 'bril' opzetten, waarmee we op veel langere golflengten kunnen kijken, in het bijzonder op infrarode en millimeter-golflengten (zie fig. 1). Deze technieken zijn pas in het laatste decennium sterk ontwikkeld, en dankzij nieuwe telescopen zoals de ISO-satelliet en de James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) op Hawaï is nu een scenario voorhanden voor het ontstaan van lichte, individuele sterren zoals onze zon (zie fig. 5).

In de eerste stap van dit scenario trekt een deel van een wolk zich langzaam samen. Dit wordt lange tijd tegengewerkt door turbulente bewegingen van moleculen en zwakke magneetvelden, maar deze zijn niet in staat om de wolk eeuwig in stand te houden. In het centrum vormt zich dan snel een compacte kern, de zogenaamde protoster. Omdat de wolk altijd wel

een zekere 'draaiing' heeft, gaat het invallende gas steeds sneller draaien en komt uiteindelijk in een cirkelvormige roterende schijf om de nieuwe protoster terecht. Er is maar een heel klein beetje draaiing nodig, omdat de wolk tot heel veel kleinere afmetingen ineenstort. Het is als een kunstschaatsster tijdens een pirouette, maar dan met armen die 10.000 keer korter worden.

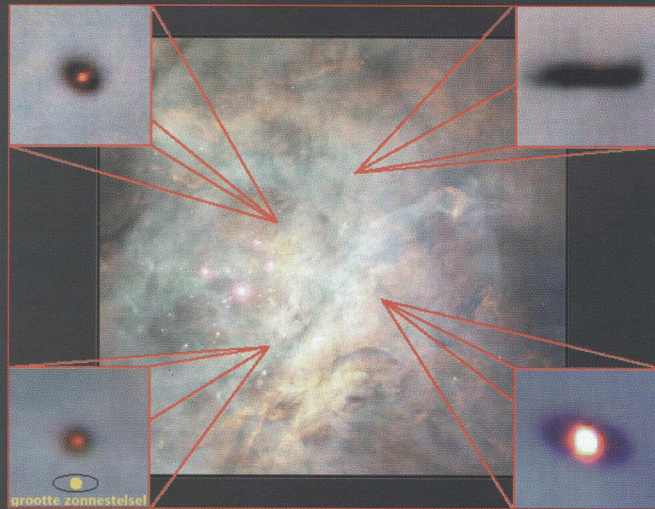
De schijf speelt een cruciale rol in het verdere verloop van de ster- en planeetvorming. Ten eerste verloopt de opbouw van de ster via de schijf. Hierbij ontwikkelt zich ook een uitstroom van materie die gas en stof via de polen wegblaast, terwijl op de evenaar materiaal op de nieuwe ster blijft regenen. In de loop van de tijd is het meeste omringende gas en stof weggeblazen en stopt de ster met groeien. Er blijft een zichtbare ster over met een schijf, waarvan de grootte vergelijkbaar is met die van ons zonnestelsel. Recente waarnemingen tonen aan dat vrijwel alle sterren geboren worden met zo'n schijf, en dat de massa van de schijf ongeveer tien keer de massa van Jupiter heeft – de zwaarste planeet in ons zonnestelsel. Dit betekent dat zich rond het merendeel van de jonge sterren voldoende materiaal bevindt om planeten te vormen. We noemen deze schijven daarom wel 'proto-

planetaire' schijven. Onlangs heeft ook de Hubble-ruimtettelescoop zulke stofschijven aangetoond rond jonge sterren in de Orionnevel, waar ze prachtig als silhouetten te zien zijn (fig. 6).

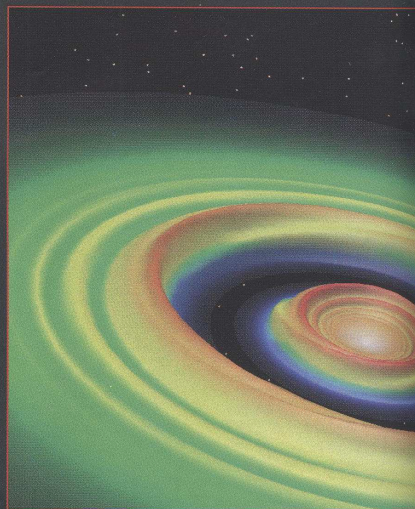
Astronomisch gezien vindt de vorming van sterren op zeer korte tijdschaal plaats. Het heelal is zo'n 15 miljard jaar oud, en onze zon is inmiddels op de middelbare leeftijd van zo'n 5 miljard jaar aangeland. De geboorte van sterren neemt maar een fractie van deze tijdschaal: in ruim honderdduizend jaar wordt een ster opgebouwd uit de interstellaire materie, terwijl de vorming van de eerste planeten rond de nieuwe ster al binnen een paar miljoen jaar kan plaatsvinden.

Protoplanetaire schijven en het ontstaan van zonnestelsels

Kant postuleerde reeds in 1755 dat ons zonnestelsel uit een 'oernevel' vergelijkbaar met zo'n circumstellaire schijf is ontstaan. Zijn uitspraak 'Geef mij materie, en ik zal er een wereld van maken' toont aan dat hij ervan overtuigd was dat planetenstelsels makkelijk te vormen zijn. Al ruim een eeuw eerder zijn meerdere geschriften te vinden over 'de veelheid van werelden en de bewoonbaarheid van sterren', en was men ervan overtuigd dat de mensheid en onze aarde geen



6. Protoplanetaire schijven in de Orionnevel, gefotografeerd met de Hubble-ruimtettelescoop. De grootte van ons zonnestelsel is ter vergelijking aangegeven in het paneel links onder. (Illustratie C.R. O'Dell & S.K. Wong 1996 en NASA/STScI).



7. Model van de dichtheidsverdeling in een protoplanetaire schijf, waarbij een planeet een deel van de schijf heeft schoongeveegd. (Illustratie G. Bryden 1999).

unieke positie in het heelal hebben. Dat andere planetenstelsels helemaal niet op ons eigen zonnestelsel hoeven te lijken, is bevestigd door de recente waarnemingen van exoplaneten. In ons zonnestelsel is de aarde de 'third rock from the Sun', terwijl de grote gasrijke planeten zoals Jupiter en Saturnus veel verder van onze zon staan. In andere planetenstelsels cirkelen Jupiterachtige planeten juist heel dicht rond de ster. De gangbare theorieën voor de vorming van planeten, die waren geënt en afgestemd op ons eigen zonnestelsel, moeten dus worden herzien.

Nu bekend is dat vrijwel alle jonge sterren omgeven zijn door zo'n 'oernevel', rijst de vraag hoe vaak planetenstelsels in de schijven worden gevormd en op welke manier. Tot nu toe hebben we nog geen directe waarnemingen van de vorming van planeten; dit komt doordat de schijfjes heel klein zijn op de afstand van de meest nabije ster-vormingsgebieden (minder dan een boogseconde), zodat een nieuwe generatie infrarood- en millimeter-telescopen met hoog scheidend vermogen nodig is om de schijfjes op te lossen. Het hieronder beschreven scenario is vooral gebaseerd op indirecte aanwijzingen en computersimulaties.

Het basisidee is dat planeten ge-

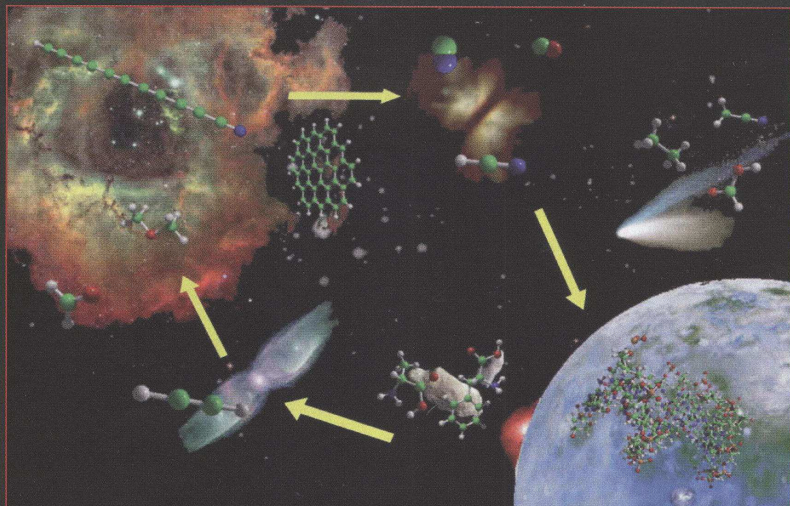
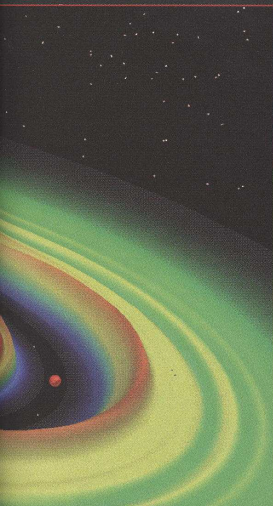
vormd worden door het geleidelijk aaneenklitten van stof- en ijsdeeltjes in de schijf tot grotere deeltjes. Zodra het omringende gas en stof is weggeblazen en de groei van de ster stopt, komt de schijf tot 'rust' en zijn de bewegingen van het gas en stof minder turbulent. Onder deze omstandigheden kunnen de deeltjes in vrij korte tijd, zo'n honderdduizend jaar, verder samenklonteren tot biljartballen en uiteindelijk 'planetesimalen': klonters met een grootte van een paar kilometers. Deze planetesimalen zijn groot genoeg om via de zwaartekracht invloed op elkaar te kunnen uitoefenen en daardoor met elkaar te kunnen botsen. Bij een deel van de botsingen zullen de rotsblokken weer verpulverd worden tot kleine gruisdeeltjes, maar hoe groter de planetesimalen en hoe lager de snelheden, des te groter de kans dat ze de botsing overleven en tot een groter lichaam versmelten. Na enkele tientallen miljoenen jaren hebben zich lichamen met de massa en grootte van onze maan gevormd. De aardse planeten ontstaan door verdere samensmelting, vermoedelijk op een tijdschaal van zo'n 100 miljoen jaar.

Als zich eenmaal een vrij grote kern heeft gevormd, kan deze door het opvegen van gas en stof in zijn baan rond de ster verder in massa

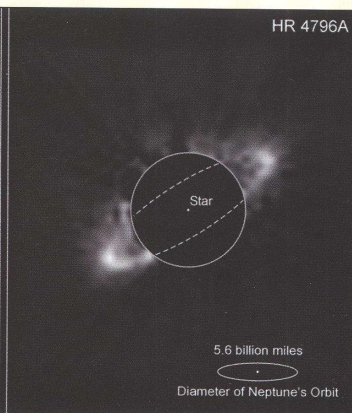
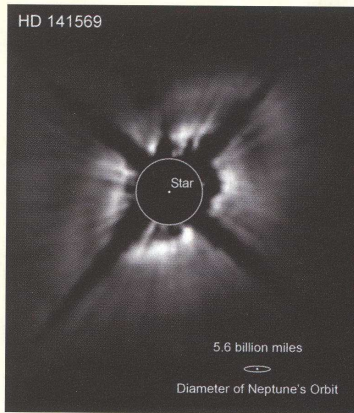
toenemen (zie fig. 7 en 9). Objecten met massa's die ruim tien keer zo groot zijn als die van onze aarde zijn zwaar genoeg om de gassen (waterstof en helium) blijvend aan zich te binden en gasrijke reuzenplaneten zoals Jupiter en Saturnus te vormen. Dit moet dan wel relatief vroeg in de evolutie van de schijf gebeuren, als er nog voldoende gas is. Op een termijn van zo'n 10-20 miljoen jaar kan het gas uit de schijf worden weggeblazen of verdampen, en stopt de mogelijkheid om gasachtige planeten te vormen. Overigens zijn de precieze tijdschaal en het mechanisme waardoor het gas verdwijnt nog niet goed bekend. Aardse protoplaneten kunnen de gassen niet vasthouden, en als ze bovendien dichtbij de ster gevormd worden of naar de ster toe migreren, zullen alle ijzen verdampen. Dat er desondanks veel water op onze planeet is, is te danken aan de ontgassing die optreedt bij vulkanische activiteit en mogelijk ook aan de aanvoer uit de ruimte in de vorm van kometen.

Kometen: bodes uit het vroege zonnestelsel?

In de huidige theorieën zijn kometen de restanten van de bouwstenen van planeten: materiële klonters met een grootte van een paar kilometer die veel ijs bevatten en



8. Kringloop van het gas en stof van interstellair wolken, via circumstellair schijven en kometen naar nieuwe planetenstelsels, waar de moleculen de bouwstenen vormen voor mogelijk leven. Uiteindelijk geven sterfende sterren weer een deel van hun materiaal terug aan het interstellair medium, nu verrijkt met zwaardere elementen gevormd door kernfusie tijdens het leven van de ster. (Illustratie R. Ruiterkamp, naar P. Eberfreund & S. Charney 2000).



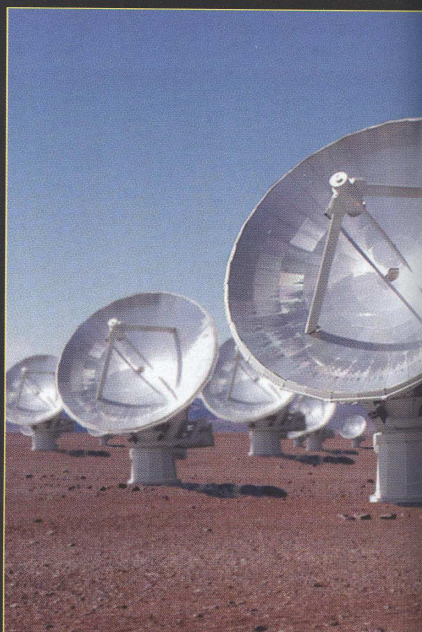
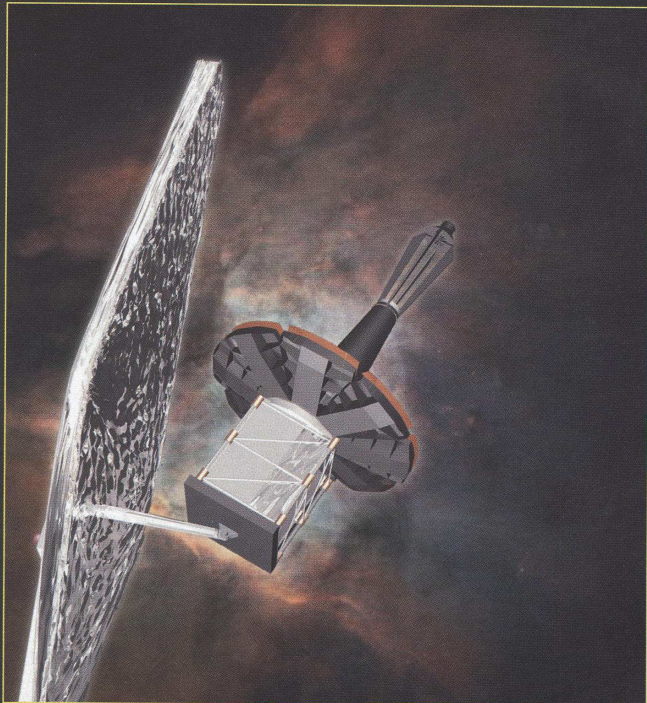
9. Verstrooid licht van stof in de puïnschijven rond de sterren HD 141568 en HR 4796A, gefotografeerd met de infraroodcamera van de Hubble-ruimtetelscoop. De gaten in het binnenste deel van de schijven kunnen een aanwijzing zijn voor de aanwezigheid van planeten (Illustratie A. Weinberger et al. 1999 en NASA/STScI).

daarom te vergelijken zijn met een vuile sneeuwbal. Kometen brengen het grootste deel van hun tijd door in het buitenste, koude, deel van ons planetenstelsel (buiten de baan van Neptunus). Daar zijn ze nog

vrijwel in hun oorspronkelijke staat. Zo af en toe wordt de baan van één van de vele kometen verstoord, waardoor deze dichterbij de zon komt. Het ijs verdampt dan door de warmte en straling van de zon, hetgeen resulteert in de prachtige staarten van kometen, zoals bijvoorbeeld de kometen Hyakutake en Hale-Bopp die in 1996-1997 met het blote oog te zien waren. We kunnen de chemische samenstelling van deze kometen met de

nieuwe telescopen analyseren en deze toont grote overeenkomsten met die van de interstellaire wolken waarin sterren worden geboren (fig. 8). Het is fascinerend om ons te realiseren dat deze staarten nog steeds de interstellaire moleculen uit de vormingstijd bevatten!

In het vroege zonnestelsel werden de banen van de planetesimalen door de jonge Jupiter flink verstoord, waardoor de jonge aardse planeten een 'kosmische hagelstorm' van inslagen ondervonden, zoals blijkt uit de vele kraters op de Maan en Mars. Een belangrijke vraag is of de complexe organische moleculen die in de interstellaire wolken en kometen aanwezig zijn, zo'n inslag kunnen overleven en daarmee de bouwstenen kunnen vormen voor mogelijk leven op de nieuwe planeet. Dit hangt sterk af van de snelheid waarmee de materie inslaat: als stukken van de komeet in de bovenste lagen van de atmosfeer afbreken, kunnen er stofdeeltjes met lage snelheden 'neer-dwarrelen' op het oppervlak. Bij de grote explosies waarmee de inslagen van grote brokstukken gepaard gaan, blijven uiteraard weinig moleculen over.



10. 'Artist impression' van de Next Generation Space Telescope, die naar verwachting vanaf 2010 de opvolger zal zijn van de Hubble-ruimtetelscoop.

Nieuwe faciliteiten

Alhoewel er nu een scenario voor de vorming van sterren en planeten voorhanden is, heeft de huidige generatie telescopen niet de gevoeligheid en ruimtelijke oplossing om planetenstelsels rond andere sterren (volwassen of in wording) te onderzoeken. De afstand zon-aarde (1 astronomische eenheid) komt op de afstand van nabije stervormingsgebieden als die in Taurus of Ophiuchus overeen met 10 milli-boogseconde, terwijl de huidige millimeter- of infraroodtelescopen typisch een factor 100 lagere resolutie hebben. In de eerste twee decennia van de 21ste eeuw zijn enkele nieuwe faciliteiten gepland die wél de gewenste gevoeligheid of scheidend vermogen hebben. In het infrarood zal in 2003 als eerste de Amerikaanse *Space InfraRed Telescope Facility*, een moderne versie van de ISO, worden gelanceerd. Deze satelliet kan stofschijven met een fractie van de massa van de maan op afstanden van een paar honderd lichtjaar detecteren. Deze waarnemingen zijn vooral belangrijk als voorbereiding op de *Next Generation Space Telescope* (NGST) – rond 2010 de opvolger

van de Hubble-ruimtetelescoop – die nog eens een factor 10-100 hogere gevoeligheid en ruimtelijke oplossing heeft (fig. 10). Op de aarde zullen de Very Large Telescope en VLT Interferometer (VLT/VLTI) van de European Southern Observatory (ESO) en vergelijkbare telescopen belangrijk zijn om de vereiste milli-boogseconde-resolutie te halen, waarmee protoplanetaire schijven onderscheiden kunnen worden en heldere reuzenplaneten zoals Jupiter direct waargenomen kunnen worden. Om aardse planeten zichtbaar te maken is echter een interferometer in de ruimte nodig; plannen voor zulke missies worden momenteel door de ESA en NASA ontwikkeld.

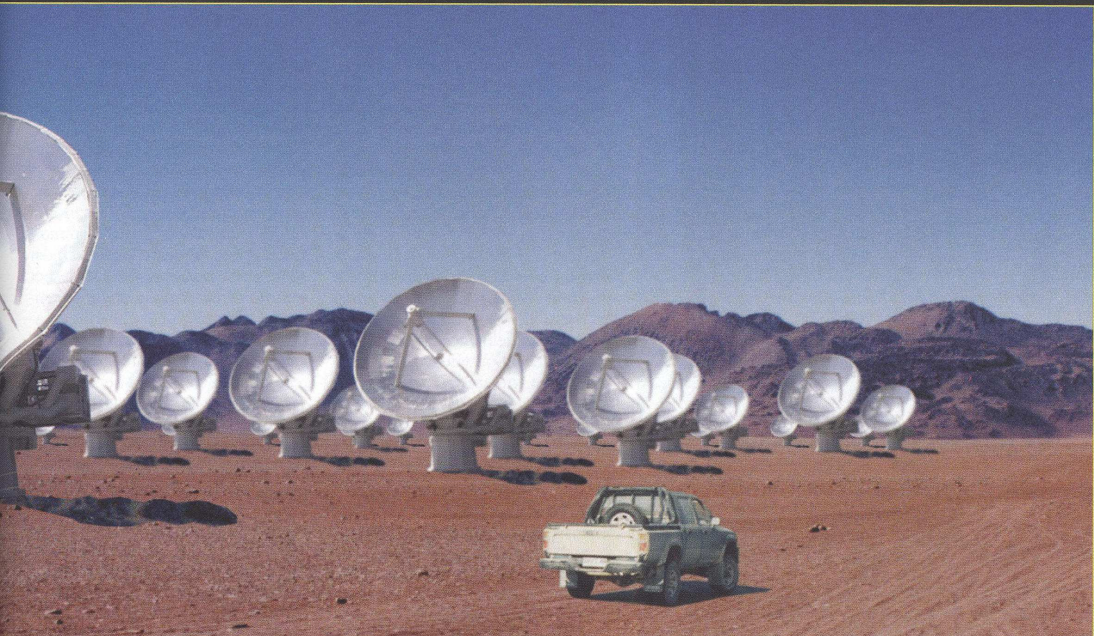
De grote stap voorwaarts in het millimeter-gebied komt met het ALMA-project, de *Atacama Large Millimeter Array*, een samenwerking tussen Europa, Amerika en mogelijk Japan, waarbij 64 telescopen op een hoogvlakte in Chili worden gebouwd (zie fig. 11). ALMA kan de allereerste stappen in de vorming van een protoster, net na de ineenstorting van de wolk, in kaart brengen, en heeft ook de ge-

voeligheid om circumstellaire schijven op de schaal van de baan van de aarde te bestuderen. Gaten in deze schijven kunnen als indirecte aanwijzingen voor de aanwezigheid van planeten worden opgevat (fig. 7). Samen met de nieuwe infraroodtelescopen kunnen astronomen dan ook voor het eerst de chemische evolutie van het gas en stof volgen vanaf de interstellaire wolk tot aan de vorming van nieuwe planetenstelsels, en daarmee de ingrediënten voor mogelijk leven in de ruimte in kaart brengen.

Dit artikel is gebaseerd op eerdere artikelen over dit onderwerp van Rens Waters, Christoffel Waelkens, Michiel Hogerheijde, Willem Schutte, Hui-Jan van Langevelde en Ewine van Dishoeck in *Zenit* en *Natuur & Techniek*.

Literatuur:

- E.F. van Dishoeck (1992), *Natuur & Techniek* 12, p. 914
- E.F. van Dishoeck (2001), Spinoza 2000 lezing (NWO)
- E.F. van Dishoeck (2001), hoofdstuk 5 in *Evolutie in Weer- en Sterrenkunde, honderd jaar Nederlands onderzoek*, NVWS-jubileumboek, red. M. Drummen, C. de Jager en H. van Woerden.
- Verschillende artikelen in *Zenit* mei 1999 'Ontstaan en evolutie van zonnestelsels'



11. 'Artist impression' van de Atacama Large Millimeter Array, die vanaf 2003 op de Chajnantor-hoogvlakte in Chili zal worden gebouwd en rond 2011 zal zijn voltooid. (Illustratie NAOJ)