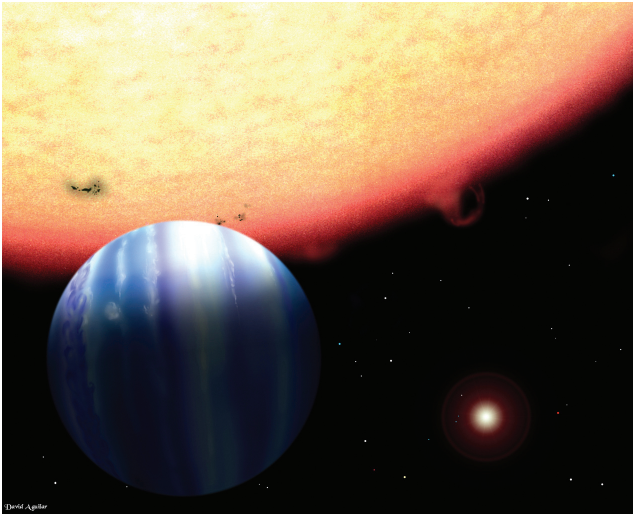

Nederlandse Samenvatting

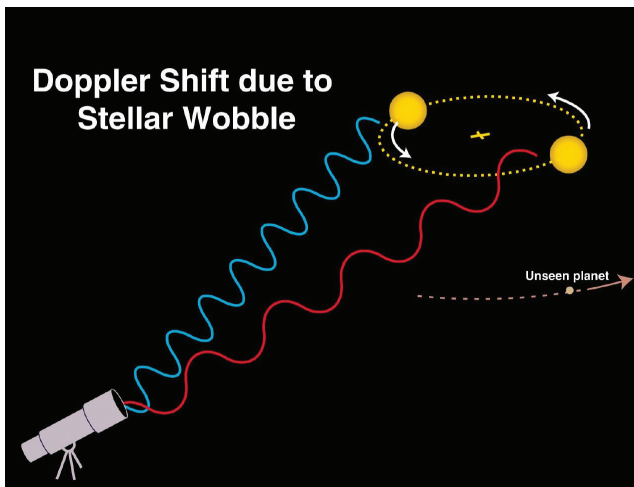
Gebaseerd op *'Werelden in Wording'*
Zenit, mei 2008

Sinds de jaren negentig worden met de regelmaat van de klok planeten buiten ons zonnestelsel gevonden. Deze zogeheten exoplaneten zijn vaak erg zwaar en staan in veel gevallen dicht bij de moederster. In bijna alle gevallen worden de exoplaneten overstraald en dat maakt het vinden van deze objecten erg lastig. Door de ontwikkeling van nieuwe, gevoelige instrumenten worden steeds meer exoplaneten ontdekt: in januari van dit jaar stond de teller op 271 planeten. In dit artikel bekijken we de vorming van planeten.

De eerste exoplaneet werd in 1995 ontdekt door de Zwitserse astronoom Michel Mayor. Hij vond een planetaire begeleider bij de ster 51 Pegasi in het sterrenbeeld Pegasus. Deze exoplaneet wordt sindsdien 51 Pegasi B genoemd. Zoals gezegd in de inleiding is het vinden van exoplaneten lastig en ontdekkingen zijn altijd indirect. Het bestaan van de planeet (of planeten) kan namelijk afgeleid worden uit de beweging van de moederster. Dit principe is een direct gevolg van de derde wet van Newton: als een voorwerp A een gegeven kracht op een voorwerp B uitoefent, dan gaat deze kracht gepaard met een even grote, maar tegengestelde kracht van B op A. De zon (A) trekt aan de aarde (B), wat resulteert in een beweging van de aarde om de zon met een snelheid van 30 km/s. Het omgekeerde geldt ook: de zon ondervindt een tegengestelde, maar even grote kracht. Oftewel: actie = reactie. De zon is echter veel zwaarder en is daarom de beweging een stuk kleiner. De mate van beweging is omgekeerd evenredig aan de massa: aangezien de zon ongeveer 300 000 maal zwaarder is dan de aarde, is de snelheid van de zon als gevolg van onze planeet ongeveer tien cm/s. De beweging van de moederster is groter naarmate de planeten grotere massa's hebben en voor planeten die dicht bij de ster staan. De beweging van de



Figuur 3.1: Een impressie van een gasplaneet dicht bij de ster. Dit soort planeten wordt ook wel aangeduid als hete Jupiterachtigen. Artist impression: (David A. Aguilar, Harvard-Smithsonian CfA)



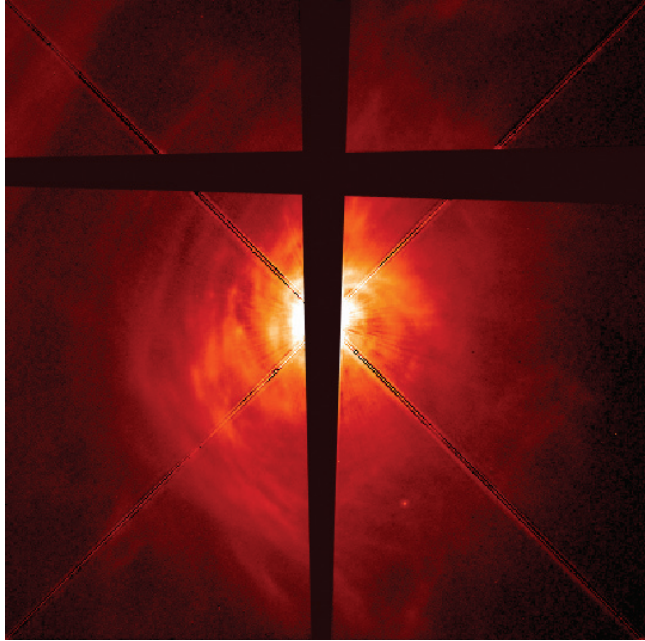
Figuur 3.2: Een schematische weergave van het Dopplereffect. De beweging van de ster ten opzichte van de waarnemer veroorzaakt een blauwverschuiving als de ster naar ons toe beweegt en een roodverschuiving als de ster van ons af beweegt. Deze verschuiving kan gemeten worden in het spectrum van de ster en zodoende kan de massa van de planeet bepaald worden. (Illustratie: obswww.unige.ch)

zon die door Jupiter wordt veroorzaakt is zo'n tien m/s en zou dertig m/s bedragen wanneer de reuzenplaneet op de plek van de aarde zou staan.

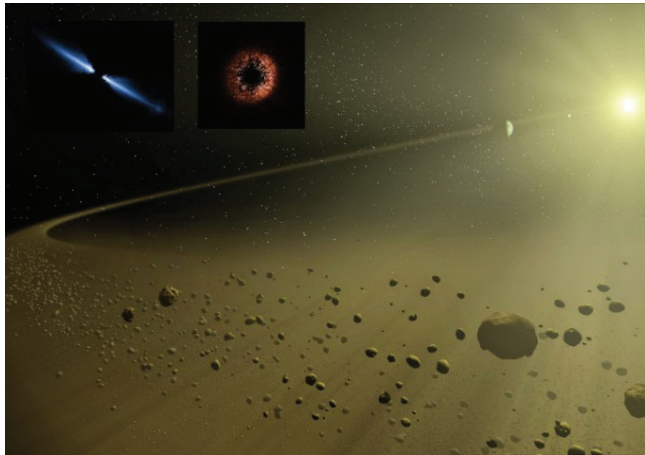
Deze beweging vinden we terug in het spectrum van de ster. Wanneer de ster naar ons toe beweegt, schuift het spectrum naar een kortere golflengte (het blauw) en wanneer de ster van ons af beweegt, gebeurt het omgekeerde (een verschuiving naar het rood). Dit verschijnsel staat bekend als het Dopplereffect. We kennen dit effect allemaal: wanneer een ambulance met loeiende sirene naar ons toe rijdt is de toon hoog en wanneer de ambulance passeert neemt de toonhoogte af.

In het geval van de ster is de verschuiving in golflengte heel klein, maar ze is toch te zien in het spectrum en vooral als het gaat om een zware planeet die dicht bij de ster staat. De indirecte methode van zoeken is succesvol, want momenteel zijn er 271

Figuur 3.3: Een opname van de protoplanetaire schijf rond de ster AB Aurigae. De ster bevindt zich op 469 lichtjaren van de aarde in het sterrenbeeld Voerman. Het licht van de ster is ten dele geblokkeerd om overbelichting te voorkomen. De schijf is erg uitgestrekt en meet ongeveer 1300 AE in diameter. Worden hier planeten gevormd? (Illustratie: Hubble Heritage Team/NASA)



Figuur 3.4: Puinschijven zijn oude schijven waarvan het gas al verwijderd is. Alleen de brokstukken van botsingen tussen grotere objecten zijn overgebleven. Dit puin wordt door de stralingsdruk van de ster langzaam uit het planetenstelsel verwijderd. (Artist impression: Hubble Heritage Team/NASA)



exoplaneten bekend. Het is dan ook duidelijk dat planeetvorming een verschijnsel is dat vaker optreedt. Ons zonnestelsel is waarschijnlijk niet zo uniek als eens werd aangenomen.

Protoplanetaire schijf

Hoe ontstaan planeten? Deze vraag is niet eenvoudig te beantwoorden, want niemand heeft ooit een planeet zien ontstaan. Bovendien vindt de vorming van planeten dicht bij de ster plaats en ook nog eens in een schijf van kleine stofdeeltjes

(vergelijkbaar met roet). De stofdeeltjes vormen een gordijn waarachter het planeetvormingsproces zich afspeelt. Planeten ontstaan dus uit een schijf van gas (voornamelijk waterstof en helium) en stof. De roet- of stofdeeltjes zijn in feite diverse zware elementen die gecondenseerd zijn uit het gas.

De schijf is 'slechts een bijproduct van de ineenstorting: planeten ontstaan doordat de gaswolk ineenkrimpt. De gaswolk heeft een kleine rotatiesnelheid, maar door de ineenkrimping neemt de snelheid toe. Door de toenemende rotatiesnelheid valt niet alle materie op de protoplanet, maar vormt ze een schijf: de zogeheten protoplanetaire schijf. Moderne bureaustoelen zijn ideaal om deze natuurwet in beeld te brengen: neem plaats en draai rond, met armen en benen gespreid. Trek na een aantal rondjes armen en benen in: de rotatiesnelheid zal dan toenemen. Het bestaan van protoplanetaire schijven werd in 1983 bevestigd door waarnemingen met de Infra-Rood Astronomische Satelliet (IRAS).

Vormingsproces

Hoe worden planeten nu precies gevormd? Het is bekend dat het gas in de schijf door allerlei processen langzaam verwijderd wordt. Dit gebeurt bijvoorbeeld doordat het op de ster valt, maar ook door foto evaporatie. In dat laatste geval wordt een waterstof (H_2) molecuul uit de schijf vernietigd door botsing met een UV-foton (lichtdeeltje). Hierbij komt zoveel energie vrij dat het gasdeeltje uit de schijf kan ontsnappen. Men schat dat deze processen een protoplanetaire nevel binnen enkele miljoenen jaren kunnen schoonvegen.

Planeten zoals Jupiter moeten dus binnen enkele miljoenen jaren zijn ontstaan, want anders had Jupiter nooit een gasmantel kunnen krijgen. Hoe moeten we ons dit voorstellen? Volgens een van de theorieën is de gasschijf zeer zwaar en ontstaan planeten op dezelfde wijze als de zon: de zwaartekracht veroorzaakt instabiliteit die leidt tot de vorming van een gebonden object. Volgens dit model worden planeten zoals Jupiter dus in een keer gevormd.

De andere aanname is iets minder ambitieus en gaat er vanuit dat planeetvorming een geleidelijk proces is van stofdeeltjes die aan elkaar plakken. Dit begint bij stofdeeltjes ter grootte van een micron, zoals die overal in het Melkwegstelsel voorkomen (een micron is $1/1000$ van een millimeter). Deze deeltjes plakken aan elkaar en vormen stofdeeltjes van een millimeter. Deze groeien tot metersgrote stofballen en naarmate dit proces vordert ontstaan objecten met een doorsnede van een kilometer; dit worden planetesimalen genoemd (voorlopers van planeten). De planetesimalen groeien sneller, want de zwaartekracht bespoedigt het samenklonteren.

De rol van het stof

Dat stof een belangrijke rol speelt in het planeetvormingsproces is iets wat buiten kijf staat. De aarde bijvoorbeeld bestaat (met uitzondering van een zeer dunne dampkring) alleen uit zware elementen zoals ijzer en silicium. De voor het leven zo belangrijke koolstof is in mindere mate vertegenwoordigd. Er zijn aanwijzingen dat ook de gasplaneten Jupiter en Saturnus een rotsachtige kern hebben die groter is dan op grond van de samenstelling verwacht mag worden.

Het beste bewijs komt misschien wel van de exoplaneten. Uit de waarnemingen

is gebleken dat bij sterren met een relatief grote hoeveelheid zware elementen de kans op een exoplaneet groter is. Het lijkt er dus op dat er zware elementen nodig zijn om een planetenstelsel zoals het onze te kunnen vormen; de zon is wat dit betreft inderdaad meer dan gemiddeld bedeeld in het aandeel zware elementen. Dit betekent niet dat de theorie van het geleidelijke proces geen obstakels kent.

Belemmeringen

Er zijn genoeg belemmeringen te bedenken: een van de belangrijkste is dat het plakken van deeltjes niet zo eenvoudig is als het klinkt. Hoe goed iets plakt, hangt af van het materiaal (ijsdeeltjes plakken beter dan zanddeeltjes), de grootte en snelheid van de botsende deeltjes. Voor stofdeeltjes kleiner dan een millimeter is het geen probleem: het kleine spul plakt gewoon goed en de snelheden waarmee ze botsen zijn laag.

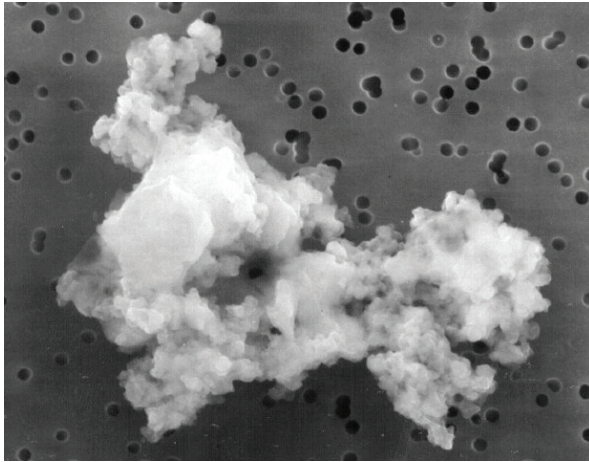
Voor macroscopische objecten—in de orde van een centimeter en groter—ligt dit anders. Door hun grootte plakken ze moeilijker aan elkaar. Dit komt doordat de plakkracht in relatie staat tot het oppervlak, terwijl de hoeveelheid materiaal die aan elkaar geplakt een directe relatie heeft met het volume (of de massa). De effectiviteit van het plakken neemt af voor grotere deeltjes. Bovendien zorgt de interactie met het gas ervoor dat juist deze objecten grote onderlinge snelheidsverschillen zullen hebben. Het is heel moeilijk om onder deze omstandigheden het plakken te bewerkstelligen; je zou eerder verwachten dat deze deeltjes uit elkaar spatten. Relatieve snelheden mogen daarom niet te hoog zijn.

Botsingen

Objecten groter dan ruwweg 100 meter worden qua botsingsgedrag beïnvloed door de zwaartekracht. Dit heeft twee gevolgen voor het samenklonteringsproces: de kans op een botsing wordt vergroot, omdat objecten elkaar aantrekken, en de aantrekkingskracht zorgt voor een natuurlijk plakmechanisme. Het samenklonteringsproces verloopt in dit stadium dan ook vrij snel. Grotere deeltjes zullen sneller groeien dan kleinere. In vaktermen wordt dit 'runaway growth' genoemd: de grote jongens eten alles op. Echter, de groei van een planeet is beperkt door de hoeveelheid materiaal die hij kan oprapen. Een aantal grote lichamen consumeert al het kleine materiaal, maar houdt een onderlinge afstand omdat ze zich in verschillende banen bevinden.

Een rotsachtige planeet zoals de aarde is ontstaan nadat een groot aantal objecten ter grootte van de maan op elkaar botsten. Tijdens deze megabotsingen (krachtiger dan de explosie van 100 miljard x miljard ton TNT) is de aarde in haar geheel gesmolten en gevormd, wat heeft bijgedragen aan haar differentiatie: de zwaarste elementen (ijzer) kwamen in de kern en de lichtere (zoals koolstof) vinden we in de buitenste lagen.

De grote planeten in het buitenste deel van het zonnestelsel ontstonden door gas te onttrekken aan de protoplanetaire nevel. Dit gebeurde al bij een tiende van de aardmassa, maar kwam bij ongeveer tien aardmassa's pas echt op gang. In het vroege zonnestelsel waren botsingen meer regel dan uitzondering: de vele kraters op de maan zijn hier een bewijs van. Veel van deze botsingen veroorzaakten een



Figuur 3.5: Dit stofdeeltje met een diameter van ongeveer tien micrometer (1/100 millimeter) is letterlijk uit de bovenste lagen van de aardse atmosfeer geplukt. De samenstelling van dit soort stofdeeltjes verschaft veel informatie over de processen die in het jonge zonnestelsel van belang waren. (Bron: NASA)



Figuur 3.6: Volgens een van de theorieën is de maan ontstaan door een botsing in het vroege zonnestelsel. De maan stond vroeger veel dichterbij de aarde en bijvoorbeeld zonsverduisteringen kwamen veel vaker voor. De jonge aarde was het slachtoffer van veel meteorietinslagen, waarvan de grotere catastrofale gevolgen hadden. (Artist impression: David A. Aguilar, Harvard-Smithsonian CfA)

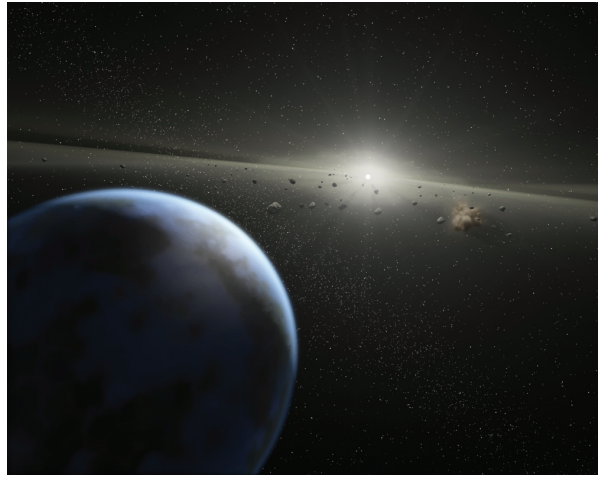
complete vernietiging van het materiaal. Het stof uit de tweede generatie wordt ook wel puin genoemd en de schijf wordt in zon geval een debris disk (puinschijf) genoemd.

Uiteindelijk nam het aantal planeten en planetesimalen af en werden de botsingen minder talrijk. Het zonnestelsel belandde hierdoor in een stabiele fase. Het proces, waarbij puin langzaam werd vermalen tot gruis, is nog steeds gaande. Op een heldere nacht kunnen we de sterk uitgedunde stofschijf zien in de vorm van het zodiakaal licht. Uiteindelijk zal het gruis door de stralingsdruk van de zon uit het zonnestelsel worden verwijderd.

Bijproducten

De voorgaande alinea's beschrijven voornamelijk de situatie van ons zonnestelsel. De planetenstelsels die zijn waargenomen bij andere sterren (met Jupiter-achtige planeten dicht bij de moederster) steken echter heel anders in elkaar. Dit is ten dele te

Figuur 3.7: Een asteroïdengordel rond de oranje dwergster HD 69830 in Puppis. De gordel werd ontdekt door NASA's Spitzer Space Telescope, die warm stof ontdekte in de nabijheid van de ster. Waarschijnlijk is dit warme stof ontstaan door de botsing van twee asteroïden. Op de voorgrond zien we een van de drie exoplaneten die om de dwergster draaien. (NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC).



verklaren doordat deze planeten veel gemakkelijker met de Dopplertechniek worden opgemerkt dan wanneer ze zich op een afstand van vijf Astronomische Eenheden (AE) of verder zouden bevinden. Het kan zijn dat deze gasachtige planeten wel ontstaan zijn in de buitenste delen van het stelsel, maar in een latere periode naar binnen zijn geëmigreerd. Het zal nog een tijd duren voordat het hele planeetvormingsproces volledig duidelijk is, maar het staat vast dat planeten minder exotisch zijn dan aanvankelijk gedacht werd. In feite zijn het de bijproducten van sterren.

