

Hoe ging vorming van de aarde en de andere planeten in zijn werk?

## De geboorte van een ZONNESTELSEL

Ons zonnestelsel telt acht planeten, vijf dwergplaneten en talloze asteroïden en kometen. Hoe zijn al die objecten ooit ontstaan? Naar het antwoord op die vraag zijn astronomen nog steeds naarstig op zoek. Gelukkig helpen nieuwe waarnemingen van andere zonnestelsels in de dop ze om hun theorieën bij te schaven.

Tekst: Marysa van den Berg

**E**r was eens, 4,6 miljard jaar geleden, een grote wolk gas en stof. Maar hij leefde niet lang en gelukkig, want onder invloed van zijn eigen zwaartekracht begon hij in te storten. In het midden ontstond de kern van wat later de zon zou worden. Daaromheen bewoog het overgebleven gas en stof. En zoals een kunstschaatser tijdens een pirouette zijn armen intrekt om sneller te om zijn as te tollen, ging de wolk terwijl hij verder in elkaar zakte steeds sneller om de pas gevormde zonnekern draaien. Op een gegeven moment draaide de wolk zo hard dat de gas- en stofdeeltjes zich verzamelden in banen rond de jonge ster. De zogenoemde protoplanetaire schijf was een feit.

*So far, so good.* Sterrenkundigen hebben een aardig beeld van hoe het bovenstaande proces zich voltrok. Maar toen kwam de volgende stap: in die protoplanetaire schijf ontstonden de aarde en de andere planeten van ons zonnestelsel. En hoe dat precies in zijn werk ging, weten we niet. Omdat veel van dit soort planeetvormende schijven zich ver van ons vandaan bevinden, zijn ze namelijk lastig te observeren. Toch worden er de laatste twee jaar steeds mooiere waarnemingen gedaan. In combinatie met betere computermodellen en berekeningen komen wetenschappers steeds meer te weten over die cruciale periode tussen 4,6 en 4,5 miljard jaar geleden waarin ons zonnestelsel vorm kreeg.

### Te weinig tijd

Het meest gebruikte model voor planeetvorming is kern-accretie. In deze theorie gaat planeetvorming heel geleidelijk. Het begint met de protoplanetaire schijf. Die bestaat grotendeels uit gas, maar bevat ook wat stofdeeltjes. Deze korreltjes van ongeveer een duizendste millimeter groot vormen ongeveer 1 procent van de totale massa. “Die korreltjes botsen met elkaar en in de loop der tijd groeien ze uit tot grotere korreltjes, kiezelsteentjes en rotsblokjes”, zegt planeetvormingsdeskundige Michiel Hogerheijde van de Universiteit Leiden. “Uiteindelijk kunnen ze zo zwaar worden als de aarde, maar ze kunnen ook doorgroeien tot zo’n vijf- tot tienmaal de massa van de aarde. In dat geval hebben ze genoeg zwaartekracht om gas in te vangen. Zo krijg je een gasreus als Saturnus.”

Een waarneming die deze theorie ondersteunt, is dat er met de ALMA-telescoop protoplanetaire schijven zijn gespot waarvan een fractie van de stofdeeltjes niet langer een duizendste millimeter groot is, maar een millimeter of zelfs een centimeter. “Ook zien we in meteorieten nog de oorspronkelijke brokstukjes waaruit ze door accretie zijn ontstaan”, zegt Hogerheijde.

Kern-accretie mag dan de meest populaire theorie zijn onder sterrenkundigen, er schort wel nog het een en ander aan. Volgens berekeningen blijkt dat het enkele tientallen miljoenen jaren kost om op deze manier planeten te vormen. Het probleem is dat we die tijd niet hebben, zegt Hogerheijde. “De meeste protoplanetaire schijven gaan maar een paar miljoen jaar mee. Daarna heeft de sterrenwind al het gas weggeblazen. Het moet dus sneller zijn gegaan dan onze modellen aangeven.”

De oplossing zou weleens ijs kunnen zijn. Drie tot vier keer zo ver van de zon als de huidige baan van de aarde lag namelijk de zogenoemde ijsgrens. Voorbij deze grens bevroor water. In dit gebied kon er zich als het ware rijp vormen op de stofdeeltjes. En omdat ijs nu eenmaal beter plakt dan stof, ging planeetvorming hier ook vlotter, waardoor gasreuzen er in *no time* waren. Alleen: dicht bij de zon is het te warm voor ijs dat de planeetvorming kan versnellen, dus ijs lost niet alles op.

En het proces kent nog een groter probleem, zegt Hogerheijde. “Terwijl stofdeeltjes groeien tot het formaat van kiezelsteentjes, zakken ze door zwaartekracht naar het midden van de schijf. Daar komen ze gas tegen dat ze afremt, en dat leidt ertoe dat ze naar de ster toe bewegen om daar te worden vernietigd. Bovendien verloopt dit proces op een gegeven moment zó snel, dat de deeltjes met een te hoge snelheid op elkaar botsen. Dan blijven ze niet aan elkaar plakken, maar vallen ze juist in kleine stukjes uiteen. In beide gevallen ben je dan materiaal kwijt om grotere objecten mee te vormen. Je zit hier als het ware tegen een barrière aan waar je niet voorbij kunt groeien.”

## Stofdraaikolken

De stap van kiezelsteentjes naar brokstukken vanaf 1 kilometer, de zogenoemde planetesimalen, is dus een lastige. Kern-accretie ontkomt er dan niet aan om hulp te zoeken bij andere theorieën. Een daarvan is *streaming instability*. Dit idee gaat uit van een soort draaikolken in de protoplanetaire schijf. In die draaikolken kunnen zich veel stofdeeltjes verzamelen. Bovendien zijn ze er beschermd tegen de afremming door het gas.

Zo’n draaiwolk kun je vergelijken met wielrenners. “Die fietsen in een peloton zo dicht mogelijk bij elkaar, waardoor de voorsten tegen de wind vechten en de renners erachter uit de wind blijven”, legt planeetvormingsexpert Carsten Dominik (Universiteit van Amsterdam) uit. “Bij streaming instability komen veel deeltjes bij elkaar in zo’n ‘draaikolk’. Zo houden ze elkaar ‘uit de wind’. Ze halen andere deeltjes in en slokken die op, waardoor de wolk nog groter wordt. Op een gegeven moment krijgt hij zoveel massa dat de zwaartekracht een rol gaat spelen. Dan klapt zo’n wolk vaak al binnen duizend jaar ineen tot een planetesimaal.” Streaming instability is waarschijnlijk niet de enige manier waarop planetesimalen zich snel konden vormen. En andere mogelijkheden zijn de zogenoemde *dust traps* (‘stofvallen’): plekken in de protoplanetaire schijf waar een hoge gasdruk een lage gasdruk ontmoet. “Je kunt dust traps vergelijken met tornado’s in een woestijn”, zegt Dominik. “Aan de binnenkant van zo’n wervelwind heerst een lage druk en aan de buitenkant een wat hogere druk. Zanddeeltjes van buiten worden naar binnen gezogen en gevangen. Zo ook in een dust trap. In die dust trap zijn de omstandigheden vrij rustig en de snelheden van de deeltjes laag. Dat bevordert de planeetvorming flink. Een planetesimaal is daardoor snel gevormd.” Maar hoe die dust traps dan precies ontstaan? Daar zijn sterrenkundigen nog niet uit.

## Kiezelsteentjes

Heb je eenmaal een aantal planetesimalen bij elkaar in de buurt, dan kunnen ze verder groeien tot planeetformaat door botsingen. Maar omdat daar precies de juiste botsingssnelheid en -hoek voor nodig zijn, verloopt dat proces niet altijd goed of gaat het te traag. Een oplossing daarvoor vormt het kiezelsteentjes-accretie-model, dat een jaar of vijf geleden ten tonele

verscheen. Hierbij botst een planetesimaal niet op objecten van vergelijkbare grootte maar op veel kleinere deeltjes; voornamelijk kiezelsteentjes van circa 1 centimeter groot. Een planetesimaal kan door zijn zwaartekracht makkelijker heel veel van dit soort kiezelsteentjes heel snel opslokken. De grotere planetesimalen pikken zelfs kiezelsteentjes af van de kleinere. Die grote rotsblokken schieten vervolgens als kanonskogels door de protoplanetaire schijf en laten zich door niets en niemand tegenhouden. En hoe groter ze worden, hoe makkelijker ze meer kiezelsteentjes en uiteindelijk ook andere planetesimalen verzamelen en nóg groter worden. Uiteindelijk kunnen ze zo uitgroeien tot een heuse planeet.

De grootte die een planeet bereikt, wordt voornamelijk bepaald door de hoeveelheid beschikbaar materiaal. Hogerheijde: “Verder bij de zon vandaan was meer massa en dus konden de planeten in de buitendelen van ons zonnestelsel – ook geholpen door ijs – groter worden. De aarde had tot wel tienmaal groter kunnen eindigen dan zijn huidige formaat, maar daarvoor was er gewoonweg te weinig vast materiaal voorhanden.”

## Aan de wandel

Met theorieën als kern-accretie, streaming instability, dust traps en kiezelsteentjes-accretie valt te verklaren hoe onze planeten zijn gevormd. Maar daarmee weten we nog niet hoe de huidige samenstelling van ons zonnestelsel tot stand kwam. Zo zouden alle vier de gasreuzen zich volgens kern-accretie te ver van de zon af bevinden. Daar is de dichtheid te klein om – zelfs met ijs – in relatief korte tijd planeten te laten ontstaan.

Dé oplossing van deze vreemde taferelen: planeetmigratie. “We denken dat het oorspronkelijke zonnestelsel compacter was, met de vier gasreuzen dicht bij de zon, in de volgende volgorde: Jupiter, Saturnus, Neptunus en Uranus”, zegt Hogerheijde. “Op een gegeven moment is Jupiter naar binnen toe gedreven en kort daarna door Saturnus weer naar buiten toe getrokken. Daarna wisselden Neptunus en Uranus van baan – waardoor Uranus nu dicht bij de zon staat dan Neptunus – en zijn ze eveneens naar buiten ‘gevloegen’.”

Deze herordening van ons zonnestelsel ging niet zonder slag of stoot. In deze woelige tijden werden veel brokstukken richting de aarde en de andere planeten dicht bij de zon geslingerd. Dat verklaart mogelijk waarom de aarde tussen 4 en 3,8 miljard jaar geleden werd bestookt door meteorieten, tijdens het zogenoemde Late Heavy Bombardment. Ook verloor ons zonnestelsel hierbij diverse overgebleven planetesimalen; die zeilen nu als asteroïden of kometen door de interstellaire ruimte.

Maar hoe kan zo’n enorme gasreus eigenlijk aan de wandel gaan? “Door de wisselwerking tussen de planeetbanen”, legt Dominik uit. “De planeten dicht bij de ster bewegen sneller dan de planeten verder weg. Stel je een touw voor tussen die planeten. Dan zullen door het getouwtrek de buitenste planeten sneller gaan bewegen en de binnenste trager. En als een planeet sneller beweegt, neemt hij een ruimere baan en beweegt hij dus naar buiten. De binnenste planeet zal door zijn lagere snelheid juist meer richting zon gaan ‘vallen’ en dus wordt de baan kleiner.”

## Stukjes en beetjes

Er zijn nog veel vragen rondom planeetvorming, maar dat maakt het vakgebied ook weer ontzettend mooi. En met elk nieuw plaatje van een protoplanetaire schijf dat ALMA of een van de andere telescopen en instrumenten weet te schieten (zie ‘5 geboortespotters’ op pagina XX), komen we weer een stapje dicht bij het ontrafelen van de geschiedenis van ons zonnestelsel.

Want dat we nog veel spannend onderzoek kunnen verwachten, is wel zeker, zo stelt zowel Hogerheijde als Dominik. “Er is een handvol schijven waarbij we planeetvorming deels in beeld kunnen brengen”, zegt Hogerheijde. “Je ziet plekken waar stof zich ophoopt, wat heel

erg duidt op kern-accretie, en gedeeltes waar heel goed streaming instability en kiezelsteentjes-accretie kunnen plaatsvinden. Dat zijn echt de eerste observaties die je nodig hebt om die theorieën te gaan bewijzen.”

“We zijn ver in het ontwikkelen van concepten voor planeetvorming, maar het is toch wel verzameling van allemaal verschillende stukjes en beetjes”, voegt Dominik toe. “Toch komen we met elk beetje dat we leren dichterbij het ontrafelen van het mysterie dat planeetvorming is.”

**Marysa van den Berg** is wetenschapsjournalist. Voor dit artikel raadpleegde zij onder andere de volgende literatuur: Wilhelm Kley: *Planet formation and disk-planet interactions*, arXiv (22 juli 2017) | Ann Finkbeiner: *Planets in chaos*, Nature (2 juli 2014).

#### [Weetjesbalk]

De planeten bewegen allemaal in vrijwel hetzelfde vlak rond de zon doordat ze uit één en dezelfde draaiende schijf zijn ontstaan.

De asteroïdegordel bestaat uit rotsblokken die het niet tot planeet schopten en dankzij de naburige planeten Mars en Jupiter een stabiele baan kregen.

Mars is kleiner dan de aarde doordat Jupiter kiezelsteentjes inpikte die de rode planeet anders hadden kunnen helpen om groter te worden.

Een gasplaneet kan ontstaan wanneer de kern tenminste een paar keer zo zwaar is als de aarde.

Bij het ontstaan van de gasplaneten was de druk op het oppervlak mogelijk zo groot dat water zich bevond in een toestand met zowel gas- als vloeistofkenmerken.

Jupiter heeft mogelijk geen vaste kern. Misschien was die er eerst wel, maar is hij later vermengd geraakt met het gas dat de planeet verzamelde.

Heftige uitbarstingen van jonge sterren kunnen stofdeeltjes doen smelten, wat mogelijk helpt bij het uitgroeien van stofdeeltjes tot rotsblokken.

De exoplaneet WASP-7B draait om de polen van zijn ster heen. Die gekke baan is mogelijk het resultaat van migrerende reuzenplaneten.

#### [KADER: lijstje]

### 5 geboortespotters

Vijf telescopen en instrumenten die een belangrijke rol spelen of gaan spelen in bestudering van planeetvorming.

**ALMA:** de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array bestaat uit 66 radioschotels en is bij uitstek geschikt voor observatie van het ontstaan van sterren en planeten. De plaatjes van planeetvormende schijven met zichtbare structuren helpen bij de ontwikkeling van planeetvormingstheorieën.

**SMA:** de Submillimeter Array is een voorloper van ALMA die vooral wordt gebruikt om te kijken naar stervormende gaswolken. Ook zijn hiermee de eerste aanwijzingen gevonden voor de wijze waarop planeetvorming plaatsvindt.

**MATISSE:** het Multi AperTure mid-Infrared SpectroScopic Experiment wordt begin 2018 op de Very Large Telescope (VLT) geplaatst. Dit instrument ziet rood licht met kortere golflengtes dan ALMA en geeft daardoor een ander beeld van planeetvormende schijven.

**SPHERE:** Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research is een instrument dat al wat langer aan de Very Large Telescope (VLT) is verbonden. Het maakt net als ALMA prachtige foto's van stervormende schijven, maar met extra aandacht voor kleine stofdeeltjes.

**JWST:** de James Web Space Telescope wordt in het voorjaar van 2019 gelanceerd. Onder meer gaat hij kijken naar organische moleculen in planeetvormende schijven. Als die worden gevonden, kan dat betekenen dat bouwstenen van het leven tijdens planeetvorming op planeten terecht kunnen komen.

[KADER: Quote]

*“Zonder Jupiter die het jonge zonnestelsel schoonveegde, zou de aarde nu overal inslagkraters hebben. We zouden elk dag bestookt worden door meteorietinslagen. Dankzij Jupiter ligt er op de plek van de CNN-studio's niet een gapend gat.”*

Michio Kaku, Amerikaanse futuroloog en natuurkundige.