Universiteit
Leiden
The Netherlands

Young suns and infant planets: probing the origins of solar systems

Bohn, A.J.

Citation
Bohn, A. J. (2021, September 22). *Young suns and infant planets: probing the origins of solar systems*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/3213465

Version:	Publisher's Version
License:	Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden
Downloaded from:	https://hdl.handle.net/1887/3213465

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Samenvatting

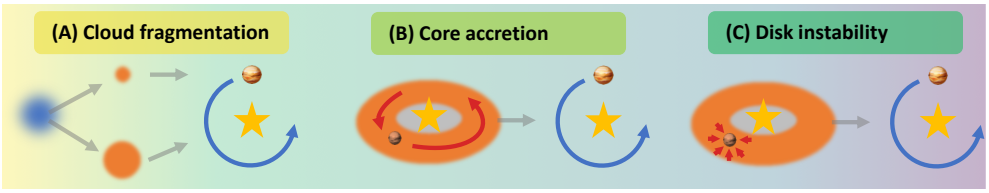
Hoe ontstaan planetenstelsels en hoe veranderen ze in de tijd? Is ons zonnestelsel uniek of is het een van vele die wellicht aardachtige planeten bevat? En zouden deze aardachtige planeten eventueel leven kunnen herbergen? Dit soort vragen hebben de mensheid al duizenden jaren gefascineerd en toch hebben we geen sluitend antwoord voor een van hen.

De afgelopen 30 jaar heeft een revolutie teweeggebracht in de kennis van planetenstelsels in ons Melkwegstelsel. In 1992 werd de eerste planeet buiten ons zonnestelsel (ook wel exoplaneet) ontdekt: deze exoplaneet is een merkwaardige wereld, met grote verschillen vergeleken met de acht planeten die de mensheid tot dan toe kende. De ster, PSR B1257+12, waar deze planeet omheen draait is aanzienlijk anders dan onze zon. PSR B1257+12 is namelijk een pulsar, een snel-draaiend object dat een overblijfsel is van sterren die veel zwaarder zijn dan de zon. Ook de eerste planeet die draait om een zonachtige ster, ontdekt in 1995, lijkt helemaal niet op een planeet uit ons zonnestelsel. Deze planeet genaamd 51 Pegasi b (afgekort 51 Peg b) is een gasreus net als Jupiter, maar staat veel dichter bij zijn ster. De afstand van de ster tot de planeet is kleiner dan de afstand van Mercurius tot de Zon, slechts 5 % van de afstand van de Zon tot de Aarde. Omdat 51 Peg b zo groot is en zo dichtbij staat, vangt hij veel licht op van de ster. Daardoor is hij erg heet, meer dan 1200 graden Kelvin, en is hij het eerste voorbeeld van een nieuwe klasse van planeten genaamd Hete Jupiters.

Door deze eerste ontdekkingen is in de laatste decennia een exoplaneet revolutie ontstaan. Vandaag de dag zijn er 4500 exoplaneten ontdekt en is er voorspeld dat er in de komende jaren nog duizenden nieuwe planeten gevonden zullen worden. Ondanks de overvloed van gedetecteerde planetenstelsels, is maar een klein aandeel (rond de 1 %) vastgelegd in een afbeelding. Dat dit aandeel zo klein is, komt door de enorme uitdagingen die overwonnen moeten worden om daadwerkelijk zo'n afbeelding te maken. De eerste uitdaging is dat de ster ontzettend veel helderder is dan de planeet die we willen afbeelden. Ten tweede staat de planeet relatief extreem dichtbij de ster. Een veelgebruikte analogie is die van een vuurvlieg (de planeet) die wordt afgebeeld naast een enorme vuurtoren (de ster). De vuurtoren is ordes van grootte helderder dan de vuurvlieg. Zelfs als men meters is verwijderd van de vuurtoren lijkt het onmogelijk om de vuurvlieg met blote ogen te onderscheiden van te onderscheiden van de enorme lichtbron. Exoplaneten staan uiteraard op veel grotere afstanden, meestal op tientallen lichtjaren van de zon.[3] Voor de vuurtoren zou dit betekenen dat we op meer dan 500 km staan en dan proberen de vuurvlieg vast te leggen.

Minder dan twintig jaar geleden is de eerste afbeelding van een exoplaneet gemaakt met de Very Large Telescope (VLT) van de European Southern Observatory (ESO). Grote vooruitgang in optische instrumentatie, waarneemtechnieken, en algoritmen voor dataverwerking maken

[3] Een lichtjaar is ongeveer 9.4×10^{12} km, wat gelijk is aan 9.4 biljoen kilometer.



Figuur 4: Mogelijke ontstaansmechanismes van gasreuzen op wijde banen.

het mogelijk om gasreuzen op wijdere banen rond hun ster af te beelden. Tot nu toe zijn er zo'n 50 van deze Joviaanse planeten direct waargenomen. De banen zijn vaak veel groter dan tien keer de afstand van de Aarde tot de Zon, en sommigen staan verder van hun ster dan alle bekende objecten in ons zonnestelsel. Hoe deze grote planeten hebben kunnen vormen zo ver van de ster is nog onzeker. Er zijn momenteel drie verschillende theorieën hierover, die worden uitgelegd in Figuur 4.

(A) Het wolkfragmentatie paradigma stelt dat objecten met een massa van een planeet ontstaan als een bijproduct van stervorming. Een moleculaire wolk die in door de zwaartekracht ineenstort kan in meerdere fragmenten uit elkaar vallen. Sommige van deze fragmenten zullen niet zwaar genoeg zijn voor het fuseren van waterstof of deuterium.[4] Als deze fragmenten minder zwaar zijn dan 13 keer de massa van Jupiter wordt het een planeet.

(B) Het kernaccretie mechanisme wordt beschouwd als het ontstaansmechanisme voor alle planeten in ons zonnestelsel. Jonge sterren worden gewoonlijk omringd door een grote schijf die bestaat uit gas en stof dat is overgebleven uit de ineengestorte moleculaire wolk. In deze schijven klonteren kleine stofdeeltjes samen zodat ze in de loop van de tijd kunnen uitgroeien tot planetesimalen tot wel een kilometer in doorsnee. Als deze planetesimalen groot genoeg zijn zullen ze gas gaan aantrekken en doorgroeien totdat ze een gasreus worden.

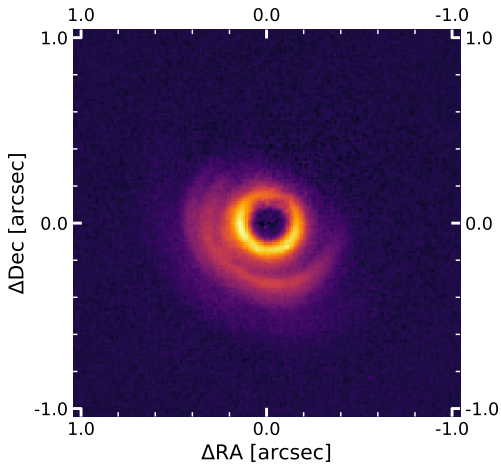
(C) Het schijfinstabiliteit scenario voorspelt dat dichte gebieden in de stofschijf zelf ook kunnen instortend door hun eigen zwaartekracht. Dit proces kan in een keer en gasreus vormen die weer materiaal uit de stofschijf aantrekt.

Deze drie potentiele ontstaansmechanismes hebben hun eigen karakteristieke tijdschalen en een verdeling van massa van planeten en planeetbanen. Om te begrijpen welk van deze drie mechanismes het meest gebruikelijke is voor het ontstaan van gasreuzen op grotere afstanden van hun ster, wordt meestal een gesimuleerde planeetpopulatie vergeleken met de waargenomen planeetpopulatie. Tot nu toe is er niet zo'n analyse gedaan voor een groot en homogene selectie van zon-achtige sterren, terwijl deze categorie van sterren juist lijkt op de vroegere condities van ons eigen zonnestelsel. Een toegewijde studie van deze sterren zou daarom inzicht kunnen geven in de geschiedenis en de evolutie van ons eigen zonnestels. Daarom hebben wij de Young Suns Exoplanet Survey (YSES) studie opgezet, waarvan de eerste resultaten worden gepresenteerd in dit proefschrift.

[4]Planeten zijn objecten die geen energie produceren met kernfusie in hun kern omdat hun massa te laag is om de temperatuur te genereren die nodig is voor dit proces. Objecten die zwaarder zijn dan 13 keer de massa van Jupiter kunnen deuterium in helium fuseren en worden daarom niet als planeet beschouwd. Deze objecten heten bruine dwergen. Als een object ongeveer 80 keer zo zwaar is als Jupiter, wordt de interne temperatuur wel hoog genoeg voor kernfusie van waterstof naar helium, waardoor ze kunnen worden beschouwd als ster.

De Young Suns Exoplanet Survey

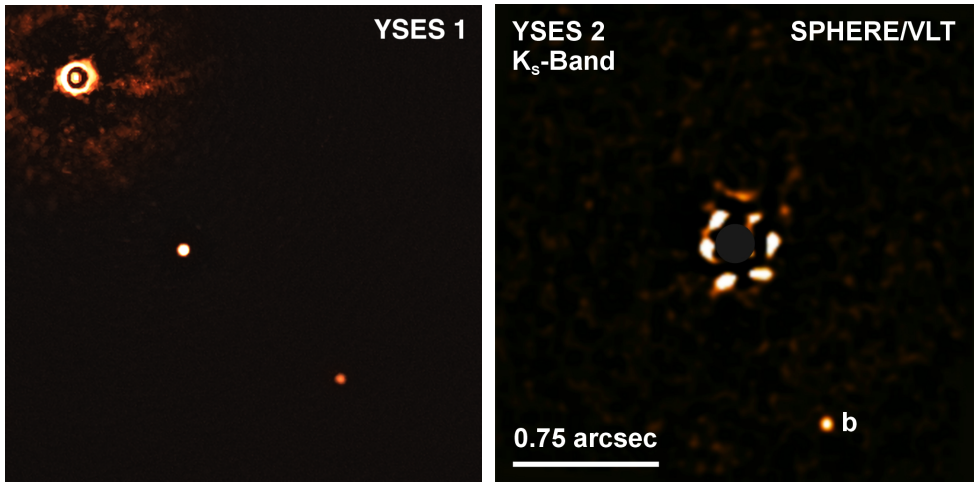
In de YSES-studie observeren we een unieke groep van 70 zonachtige sterren die horen bij de Scorpius–Centaurus sterassociatie. Deze groep van sterren staat ongeveer 400 lichtjaar van de Aarde en is buitengewoon jong vergeleken met onze 4.6 miljard jaar oude zon. Met een gemiddelde leeftijd van 15 miljoen jaar observeren we de 70 sterren kort na de fase van planeetvorming, waarvan verwacht wordt dat dit in de eerste paar miljoen jaar gebeurt. Kort na de formatie zijn planeten nog heet en dus helder, waardoor ze makkelijker te detecteren zijn. Daarom is deze selectie van sterren ideaal voor het direct waarnemen van gasreuzen. We hebben deze selectie van sterren geobserveerd met het Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research (SPHERE) instrument dat is geïnstalleerd bij de Unit Telescope 3 van ESO's VLT. SPHERE is een van de meest geavanceerde instrumenten om exoplaneten direct af te beelden. Een extreem adaptief optica systeem corrigeert het versmerende effect van de atmosfeer van de Aarde. Zonder dit systeem lukt het niet om een scherpe afbeelding te maken met een telescoop met een diameter van 8.2 meter. Een ander onderdeel van SPHERE is de zogeheten 'coronagraaf'. Dit is een ondoorzichtig masker dat het meeste sterlicht tegen houdt zodat een veel lichtzwakkere planeet, die eerst verstopt zat in de halo van de veel heldere ster, zichtbaar wordt (zie Figuur 6).



Figuur 5: Een circumstellaire schijf rond de ster Wray 15-788. De helft van deze schijf is maar zichtbaar. Dit zou kunnen komen door een extra schijf die dichterbij staat die het sterlicht blokkeert en een schaduw maakt op de zichtbare schijf. Het sterlicht in het midden van de schijf is enorm verzwakt door een coronagraaf.

Hoewel het doel van de YSES-studie het vinden van nieuwe planeten is, was het eerste resultaat de ontdekking van een circumstellaire schijf rond de ster Wray 15-788. Deze schijf is enorm: de heldere buitenste ring in Figuur 5 staat op meer dan 50 keer de afstand van de Aarde naar de zon van zijn ster. Bovendien ziet de schijf er eigenaardig uit: het lijkt erop alsof een deel van de schijf is gehuld in duisternis. Dit kan niet worden verklaard door de structuur van de schijf zoals te zien in de afbeelding. Daarom stellen wij dat er een extra schijf is die te klein is om te zien, en die scheef staat ten opzichte van de buitenste schijf. Zo'n schijf kan een schaduw werpen op sommige delen van de buitenste schijf, waardoor deze minder of niet meer zichtbaar is. Een binnenste schijf kan scheef gaan staan door de aanwezigheid van een planeet. Deze planeet is echter tot nu toe nog niet gevonden.

Het eerste planetenstelsel dat wij hebben ontdekt met de YSES-studie heeft de naam YSES 1 gekregen (zie het linker paneel van Figuur 6). Om deze ster draaien twee gasreuzen op grote afstand, en dit planetenstelsel is de eerste met meerdere planeten dat direct is waargenomen. De binnenste planeet YSES 1b staat op 160 keer de afstand van de zon tot de aarde, en de buitenste planeet YSES 1c staat zelfs twee keer zo ver weg. Ook in hun massa overtreffen ze de planeten van het zonnestelsel. YSES 1c is ongeveer zes keer zo zwaar als Jupiter, de zwaarste planeet in ons zonnestelsel. YSES 1b is zelfs veertien keer zo zwaar als Jupiter, en daarom is het nog niet zeker of het een bruine dwerg is of een planeet. Verdere waarnemingen van dit stelsel zullen deze vraag kunnen beantwoorden. Bovendien, is het uiterst interessant om de atmosferen van deze planeten te karakteriseren, zodat we wellicht hun ontstaansmechanisme kunnen achterhalen.



Figuur 6: De planetenstelsels YSES 1 en YSES 2. *Links*: Het planetenstelsel YSES 1 met twee planeten. De ster staat linksboven in de afbeelding en is verduisterd door een coronagraaf. Twee gasreuzen draaien op grote afstand rond deze zon-achtige ster. De binnenste en buitenste planeet hebben een gewicht van respectievelijk zes en veertien keer de massa van Jupiter. Image credit: ESO/Bohn et al. *Rechts*: De gasreus YSES 2b. De ster staat nu in het midden van de afbeelding en is ook verduisterd door een coronagraaf.

De nieuwste ontdekking is YSES 2b, ook een gasreus die op 110 keer de afstand van de zon tot de aarde staat en zes keer zo zwaar is als Jupiter (zie het rechter paneel van Figuur 6). Hoe YSES 2b is ontstaan is nog niet duidelijk omdat de massa beduidend lager is dan je zou verwachten voor het fragmenteren van een gaswolk (A), of voor het schijfinstabiliteit scenario (C). Ook kan het op deze grote afstand niet zijn ontstaan door kernaccretie (B). Het is wel mogelijk dat de planeet dichterbij is ontstaan en door interactie met een andere planeet naar zijn huidige plek is geslingerd. Met eventuele vervolg waarnemingen zou dit scenario beter kunnen worden onderzocht.

Toekomstperspectief

De waarnemingen van de YSES-studie zijn nog niet afgerond, en de uiteindelijke statistische analyse is dus nog niet mogelijk. Het antwoord op de vraag hoe vaak gasreuzen voorkomen rond de sterren die zijn geïncludeerd zal helpen met het bepalen welk ontstaansmechanisme dominant is voor zonachtige sterren. Nieuwe metingen van de atmosfeer van de gevonden planeten zal extra informatie geven over de evolutionaire geschiedenis van deze sterren. Hierbij zullen de toekomstige telescopen, zoals de James Webb Space Telescope, cruciaal zijn. Zij zullen inzicht geven in de chemische eigenschappen van de atmosferen van gasreuzen, wat weer gekoppeld kan worden aan de ontstaansmechanismes van deze planeten. Ook de nieuwe generatie van telescopen op aarde, zoals de Extremely Large Telescope, de Thirty meter telescope, en de Giant Magellan Telescope zullen gebruikt worden om planeten te vinden die dichterbij staan dan de planeten van YSES 1 en YSES 2. Nu zijn deze planeten nog niet detecteerbaar met de huidige generatie van telescopen. Maar als de snelheid van de huidige progressie in het vakgebied van exoplaneten zich doorzet in de komende jaren, hebben we een kans om sommige van de vragen aan het begin van deze samenvatting, inclusief de vraag over het detecteren van leven buiten ons zonnestelsel, te beantwoorden voor het eind van deze eeuw.