



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Dusty perspectives on the cradles of planets

Guerra Alvarado, O. M.

Citation

Guerra Alvarado, O. M. (2026, February 6). *Dusty perspectives on the cradles of planets*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4289494>

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/1887/4289494>

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

Nederlandse Samenvattig

We leven in een klein hoekje van ons melkwegstelsel, de Melkweg, in een planetair systeem dat we het Zonnestelsel noemen. Lange tijd geloofden we dat ons systeem het centrum van het universum was, of beter gezegd, dat de mens het centrum van het universum was, een overtuiging waarvan we nu weten dat die onjuist is. Als we hier geboren zijn en zijn opgegroeid, is het niet onredelijk om voor te stellen dat iets vergelijkbaars ook rondom andere sterren in onze Melkweg of in verre sterrenstelsels kan zijn gebeurd.

Interessant genoeg is de Zon niet eens een typische ster binnen de Melkweg, laat staan in het universum. Sterker nog, recent bewijs suggereert dat de vorming van ons Zonnestelsel mogelijk een nogal ongebruikelijk pad heeft gevolgd vergeleken met de meeste andere planetaire systemen. Toch blijft het intrigerend dat we weten dat er andere mogelijkheden bestaan, en dat leven elders kan ontstaan. De vraag blijft dan: wat leidde tot de vorming van dit specifieke planetaire systeem rond een ster met een zonnemassa, dat uiteindelijk het ontstaan van leven mogelijk maakte?

Om daar een antwoord op te vinden, moeten we teruggaan naar het allereerste begin: de geboorte van sterren en planeten, in de uitgestrekte leegte van het heelal waar gas en koud stof samenkomen, het interstellair medium (ISM).

Ster- en planeetvorming in het ISM

In ons universum bestaan enorme gebieden van gas en stof, de zogeheten moleculaire wolken, die deel uitmaken van het ISM. Dit zijn de gebieden waar sterren en planeten worden geboren. Moleculaire wolken bestaan voornamelijk uit waterstof en helium, met sporen van zwaardere elementen zoals zuurstof, stikstof en koolstof. Wanneer delen van deze wolken voldoende dicht en zwaar worden, veroorzaakt de zwaartekracht hun ineenstorting, waardoor een protoster ontstaat. Het ineenstortende materiaal, zowel gas als stof, begint op te warmen en af te vlakken tot een roterende structuur terwijl de protoster materie blijft verzamelen. Het overgebleven materiaal rond de jonge ster vormt wat we een protoplanetaire schijf noemen.

Binnen deze schijf beginnen stofdeeltjes aan elkaar te kleven, en vormen zo steeds grotere klonten. Na verloop van tijd groeien deze uit tot objecten van kilometers groot, de zogenaamde planetesimalen, die vervolgens meer materiaal blijven aantrekken en uiteindelijk uitgroeien tot planeten. Naarmate de protoster evolueert, start de kernfusiereactie in zijn centrum. Op dat moment begint de intense straling van de ster het omringende materiaal weg te blazen, waardoor alleen de planeten en planetesimalen overblijven, nu onderdeel van een nieuw gevormd sterrenstelsel. Zo'n stelsel kan miljoenen of zelfs miljarden jaren stabiel blijven, totdat de ster zijn nucleaire brandstof uitgeput heeft. Afhankelijk van zijn massa kan de ster dan exploderen als een supernova of uitzetten en eindigen als een witte dwerg. In beide gevallen keert het resterende materiaal terug naar het interstellair medium, waarmee de cyclus van ster- en planeetvorming opnieuw begint. Dit proces wordt geïllustreerd in Figuur 1.

Hoewel we via meteorieten en geologische gegevens diep in het verleden van de aarde kunnen kijken, is de beste manier om het ontstaan van planeten en mogelijk leven elders te bestuderen het observeren van andere protoplanetaire schijven, systemen die zich nog in de vroege stadia

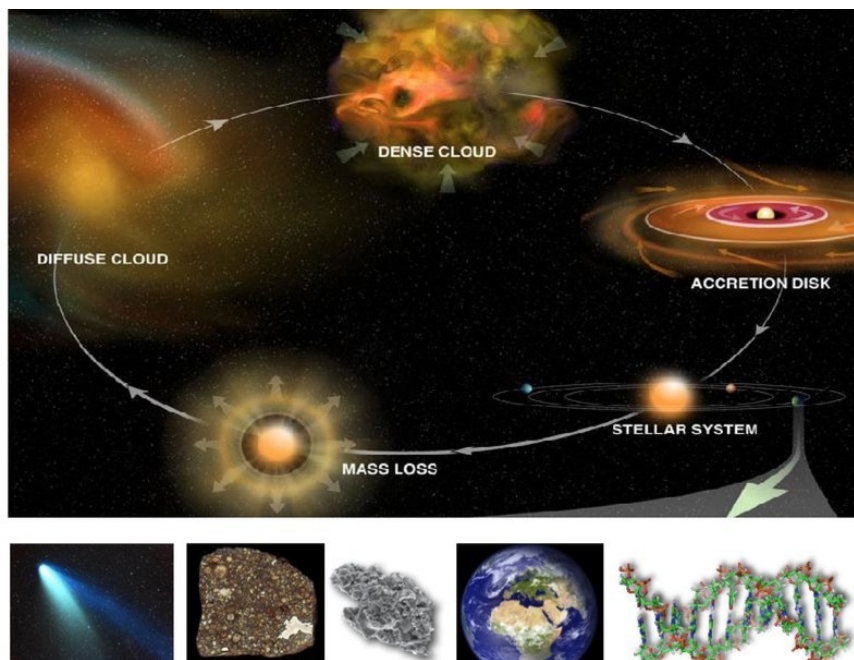


Figure 1: Deze afbeelding illustreert het volledige proces van stervorming, samen met de vroege stadia van planeetvorming. Alles begint met een moleculaire wolk, een koude en dichte regio van gas en stof in het interstellair medium. Na verloop van tijd storten delen van deze wolk in onder invloed van de zwaartekracht, waardoor een protoster ontstaat met een accretieschijf van materiaal eromheen. Terwijl de protoster zich ontwikkelt, wordt de omringende protoplanetaire schijf de geboorteplaats van planeten. Binnen deze schijf botsen kleine deeltjes en klusteren samen, wat uiteindelijk leidt tot de vorming van stofdeeltjes en planeten. Na verloop van tijd wordt een groot deel van het materiaal in de schijf weggeblazen, en blijft een planetair systeem over met complexe organische moleculen, atomen en reststof, overblijfselen zoals planetesimalen van de oorspronkelijke schijf. Afbeelding: B. Saxton, NRAO/AUI/NSF

van planeetvorming bevinden. Deze systemen bevinden zich in nabijgelegen moleculaire wolken en bieden een uniek venster op het ontstaan van planeten zoals de onze. Om ze te onderzoeken, gebruiken we krachtige telescopen die het licht opvangen dat wordt uitgezonden door stofdeeltjes

of atomen en moleculen in deze schijven. In het bijzonder maken interferometrische telescopen het mogelijk om hun structuur in opmerkelijk detail te bestuderen, zodat we de omgevingen kunnen begrijpen waarin planeten, en mogelijk ook leven, worden geboren.

Overzicht van de thesis

In deze thesis heb ik met behulp van de modernste telescopen de eigenschappen van stof in nabijgelegen protosterren en stervormingsgebieden bestudeerd, die doorgaans lijken op de structuur weergegeven in Figuur 2. Mijn onderzoek richtte zich voornamelijk op de evolutie en groei van stof, een essentiële stap richting planeetvorming. Daarnaast heb ik onderzocht hoe moleculen, met name complexe organische moleculen, kunnen bijdragen aan het beantwoorden van fundamentele vragen over het ontstaan van planetaire systemen.

De thesis is opgebouwd uit vijf hoofdstukken. Hoofdstuk 1 geeft een inleiding tot stervorming, protoplanetaire schijven, de rol van stof en gas in deze schijven, de aanwezigheid van complexe organische moleculen, en substructuren in protoplanetaire schijf. De daaropvolgende hoofdstukken bevatten gedetailleerde analyses van stofevolutie, stofgroei en de chemie van complexe organische moleculen in verschillende stervormingsregio's.

Hoofdstuk 2: In dit hoofdstuk onderzoek ik de hoge-resolutie stofemissie van het binair systeem NGC 1333 IRAS4A, een protostellaire regio die een van de vroegste stadia van stervorming vertegenwoordigt. De studie van zulke jonge systemen is essentieel om te begrijpen wanneer en hoe planeetvorming begint. Dit werk onderzoekt of vroege aanwijzingen zoals korrelgroei of substructuurvorming al zichtbaar zijn in dit stadium, of pas later in de evolutie van de protoplanetaire schijf. De analyse toont aan dat het stof in IRAS4A1 al eigenschappen vertoont, zoals korrelgrootte en dichtheid, die gunstig zijn voor het ontstaan van planetesimalen of

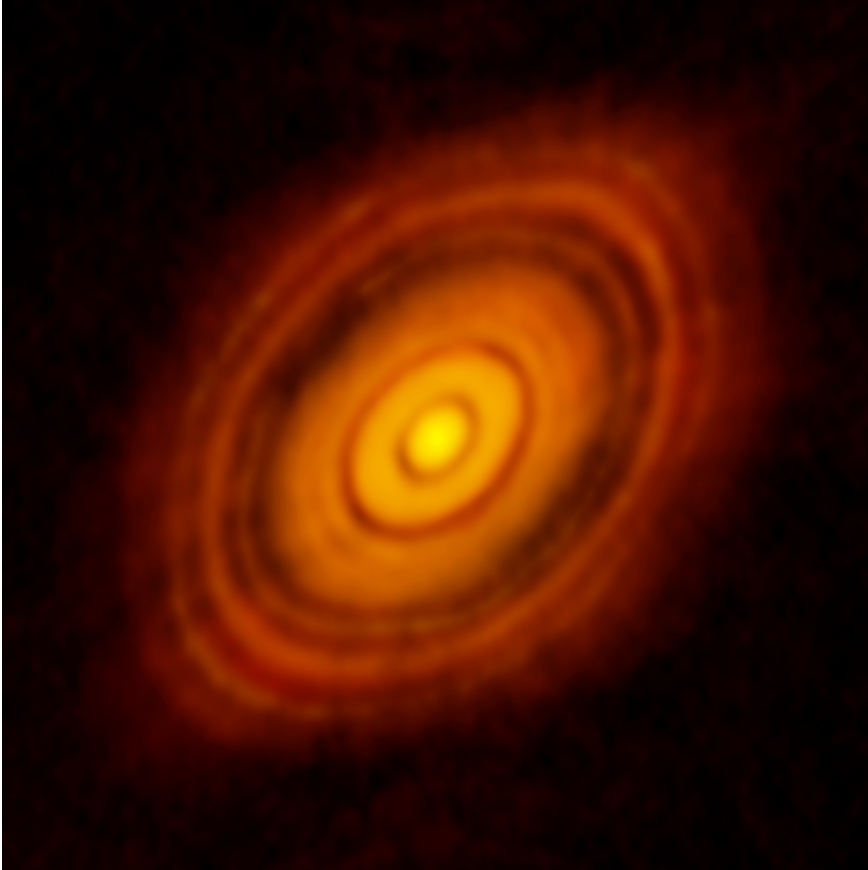


Figure 2: Deze afbeelding toont hoe een protoster met een protoplanetaire schijf eruitziet wanneer die wordt waargenomen met een telescoop zoals de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) op submillimetergolflengten. De schijf laat verschillende kenmerken zien, waaronder ringen en gaten, de zogenaamde substructuren, die mogelijk het resultaat zijn van planeetvorming of andere dynamische processen in de schijf. Afbeelding: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO); C. Brogan, B. Saxton (NRAO/AUI/NSF)

substructuren. Stralingstransportmodellen suggereren dat substructuren mogelijk al bestaan maar nog verborgen zijn onder dichte lagen gas en stof.

Hoofdstuk 3: In dit hoofdstuk richt ik me op de complexe organische moleculen rond IRAS4A2. Ik analyseer hun ruimtelijke distributie en verband met de verdeling van stofdeeltjes. De resultaten tonen aan dat de radiële en azimuthale verdeling van deze moleculen veel complexer is dan eerder werd gedacht. Dit wijst op een snelle stofevolutie in IRAS4A2, in contrast met zijn binaire metgezel IRAS4A1, waar de moleculaire emissie grotendeels verborgen blijft.

Hoofdstuk 4: Hier bestuderen we de protoplanetaire schijf HL Tau met behulp van multi-golflengteanalyses. Met modelering van het stralingstransport konden we de waargenomen emissie reproduceren en stofeigenschappen afleiden zoals korrelgrootte, dichtheid en temperatuur. Observaties met ALMA Band 9 onthullen een andere structuur en geven aanwijzingen over kleinere stofdeeltjes, grotere schijfgroottes en mogelijk een ander verticale uitgestrektheid van de schijf. We ontdekten ook een nieuwe binnenste substructuur en een opvallende asymmetrie.

Hoofdstuk 5: Hoofdstuk 5 richt zich op alle bekende schijven in de Lupus-regio. Met behulp van hoge resolutie konden we vaststellen dat meer dan 67% van deze schijven zeer compact zijn (straal < 30 au). Daarnaast vonden we nieuwe substructuren. Deze bevindingen wijzen erop dat de meeste schijven al de voorwaarden bezitten voor de vorming van een veelvoorkomend type exoplaneet: de super-aarde. Zo ontstaat een brug tussen waarnemingen van schijven en de uiteindelijke planetaire systemen.

Op basis van alle hoofdstukken concluderen we dat er meer aandacht moet worden besteed aan zowel de radiële als de verticale structuur van protoplanetaire schijven. Deze systemen zijn complexer dan eerder gedacht, met variërende geometrieën en afmetingen. Radiële variaties in de verticale structuur kunnen inzicht bieden in de initiële omstandighe-

den van planeetvorming, het ontstaan van substructuren en de triggers voor dit proces. Begrijpen of compacte of grote schijven vaker voorkomen, helpt bij het beantwoorden van een fundamentele vraag: is ons Zonnestelsel een uitzondering? Als dat zo is, zou leven wel eens zeldzamer en moeilijker te vormen kunnen zijn dan we altijd dachten.