



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Not so smooth after all: resolving dust and gas structures in protoplanetary disks

Cazzoletti, P.

Citation

Cazzoletti, P. (2019, December 12). *Not so smooth after all: resolving dust and gas structures in protoplanetary disks*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/81821>

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/1887/81821>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/81821> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Cazzoletti, P.

Title: Not so smooth after all: resolving dust and gas structures in protoplanetary disks

Issue Date: 2019-12-12

Nederlandse samenvatting

Sinds het ontstaan van de mensheid was men nieuwsgierig naar zijn oorsprong en plaats in het universum. Sterren en sterrenbeelden waren de oorsprong van ontelbare legendes en mythes, welke nog steeds terug te vinden zijn in namen van sterren en sterrenbeelden. Tegenwoordig gelooft niemand meer dat deze verhalen echt gebeurd zijn, maar ze onthullen duidelijk de intuïtie van de mensheid dat het antwoord op de vragen over zijn oorsprong en plaats in het universum alleen te vinden zijn door het observeren van de hemel. Gedurende de vooruitgang in de wetenschap is het laatste punt blijven gelden. Constant worden er telescopen gebouwd en de ruimte in gelanceerd, met als doel om naar de hemel te kijken en dezelfde vragen te beantwoorden; en in het bijzonder de vraag: hoe is het leven ontstaan?

In het heelal is er slechts één plek waar we zeker zijn dat leven is ontstaan: de Aarde. Tot ongeveer 25 jaar geleden kende we nog geen enkele planeet buiten ons eigen zonnestelsel. In 1995 werd echter de eerste *exoplaneet* ontdekt en sindsdien zijn er meer dan 4000 nieuwe exoplaneten gevonden. Deze toename aan ontdekkingen heeft een nieuwe weg geopend naar de oorsprong van het leven. Vooral het begrijpen van de vorming van deze planeten uit zowel fysisch als chemisch oogpunt is een belangrijk vakgebied.

De weg van een grote interstellaire wolk, zoals die in Fig. 6.15, naar planeten is complex en omvat veel verschillende fysische processen op verschillende schalen (zie Fig. 1.2). Veel aspecten van deze weg begrijpt men daarom nog steeds niet goed. Wel is het duidelijk dat sterren en planeten vormen in grote interstellaire wolken. 99% van de materie in deze wolken bestaat uit moleculair gas, de overige 1% bestaat uit stof. Sommige wolken zijn instabiel onder hun eigen zwaartekracht, wat betekent dat hun massa te hoog is om ondersteund te worden door de druk van het gas waar ze van gemaakt zijn. Als gevolg hiervan beginnen deze wolken onder hun eigen zwaartekracht ineen te storten. Tijdens deze instorting beginnen ze harder en harder te roteren door het behoud van impulsmoment, totdat op een gegeven moment de centrifugale kracht de ineen-



Figure 6.9: Opname van de donkere wolken in het Corona Australis stervormingsgebied. De dichtere wolken blokkeren effectief het licht van verre achtergrondsterren in de Melkweg door de grote hoeveelheden stof. Auteursrechten figuur: Fabian Neyer.

storting kan tegenwerken en een schijfachtige structuur wordt gevormd. Deze structuren worden *protoplanetaire schijven* genoemd en zijn de geboorteplaats van planeten.

Stof in protoplanetaire schijven kan dan groeien van de grootte van kleine zandkorrels tot kleine steentjes, keien en planetoiden, welke de bouwstenen zijn van rotsachtige planeten en de kernen van gasreuzen. Wanneer deze gevormd zijn, zullen planeten gaten en ringen creëren in het resterende materiaal van de schijf.

Tot ongeveer 10 jaar geleden kon men deze structuren nog niet waarnemen vanaf de Aarde omdat de ruimtelijke resolutie van de telescopen in die tijd niet genoeg was. Het was alsof je van een verre afstand naar een schilderij keek: de grote structuren kan je zien maar de details zijn onzichtbaar. Evenzo leken schijven glad en symmetrisch. Echter, als je dichterbij het schilderij komt worden meer details zichtbaar en als je maar dichtbij genoeg komt kan je zelfs enkele penseelstreken van elkaar onderscheiden (zie bijv. Fig. 6.16). Wat het voor ons mogelijk heeft gemaakt om "dichterbij" protoplanetaire schijven te komen zijn de weergaloze mogelijkheden van een nieuwe krachtige telescoop: de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). Wanneer er naar schijven wordt gekeken met de volledige mogelijkheden van ALMA, dan zijn deze schijven niet meer glad en symmetrisch maar zijn er vele structuren en morfologieën te zien; zelfs meer dan wat men van tevoren had verwacht.

Naast ALMA zijn er andere telescopen en instrumenten, zoals VLT/SPHERE en Gemini/GPI, ontwikkeld om te zoeken naar planeten die verborgen liggen in protoplanetaire schijven. Interessant en tegen alle verwachtingen in is dat

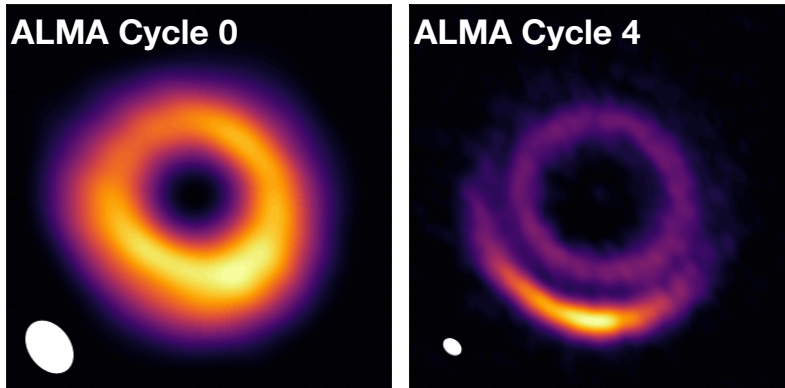


Figure 6.10: Afbeeldingen van de protoplanetaire schijf rond HD 135344B met twee verschillende resoluties. Aan de linkerkant, de allereerste ALMA afbeelding met $0.''25$ (~ 30 au) resolutie die een licht asymmetrische ring lijkt te hebben. Aan de rechterkant, een meer recente ALMA afbeelding van hetzelfde object, maar nu met een hogere resolutie van $0.''06$ (~ 8 au): met deze resolutie kunnen meerdere substructuren worden onderscheiden, zoals een binnenste symmetrische ring en een buitenste azimuthale asymmetrie.

slechts een handvol planeten in schijven zijn ontdekt.

De alom geobserveerde substructuren gecombineerd met het gebrek aan gedetecteerde planeten in schijven maken het moeilijker om substructuren te verklaren door de interactie tussen schijf en planeten. De vragen die dit proefschrift met name zal proberen te beantwoorden zijn:

- Kunnen substructuren in protoplanetaire schijven ontstaan door andere fenomenen dan planeet-schijf interacties?
- Welke informatie kunnen substructuren in protoplanetaire schijven geven over de fysische structuur van de schijf?
- Zijn substructuren in het gas gerelateerd aan die in het stof, of leveren deze onafhankelijke informatie?
- Met welke mate zijn eigenschappen van de schijf afhankelijk van evolutie in plaats van de begincondities?

Dit proefschrift en vooruitzicht

Hoofdstuk 1 van dit proefschrift geeft een algemene inleiding over de theorie van ster- en planeetvorming. De fases die leiden van de moleculaire wolk naar

een schijf worden uitgelegd samen met het fysische mechanisme dat een rol speelt in de groei en evolutie van stofdeeltjes. Tevens worden de telescopen en numerieke methodes die gebruikt zijn in de analyse geïntroduceerd.

Hoofdstuk 2 presenteert een onderzoek naar de structuren in de schijf rond GG Tau A. De eigenaardigheid van deze protoplanetaire schijf is dat deze niet rond een enkele ster draait, maar rond een dubbelster. De schijf rond de dubbelster GG Tau A vertoont een zeer smalle ring op ongeveer 200 AU van de dubbelster. De regio tussen de dubbelster en de ring is compleet stofvrij en bijna helemaal gasvrij aangezien al het materiaal hier naar buiten is gedrukt door de interactie met de zwaartekracht van de dubbelster. De interactie tussen de tweede ster en de schijf is vergelijkbaar met wat er zou gebeuren als er in plaats van de tweede ster een zware planeet aanwezig was. Afhankelijk van de massa van de tweede ster voorspellen theoretische berekeningen echter een andere locatie voor de ring. De positie van de ring is ook afhankelijk van de baan van de tweede ster. Na het draaien van hydrodynamische simulaties en het vergelijken van de resultaten hiervan met de waarnemingen van de schijf en de beweging van de sterren, concluderen we dat de baan van de ster die het beste past bij de observaties een baan is die in een ander vlak ligt dan het vlak waar de schijf in ligt.

Hoofdstuk 3 en 4 richten zich op een ander specifiek object, namelijk HD 135344B (zie Fig. 6.16). Al vanaf de allereerste ALMA observaties leek de schijf rond HD 135344B interessant met een grote ~ 50 AU holte aan de binnenkant en een stof ring vergelijkbaar met GG Tau A, maar net iets kleiner, zoals we zouden verwachten wanneer deze is ontstaan door een planeet. Een ander verschil met GG Tau A is het feit dat de HD 135344B schijf niet symmetrisch is, maar helderder is in het zuiden. Daarnaast laten waarnemingen van verstrooid zichtbaar licht, wat afkomstig is van kleine stofdeeltjes in de bovenste laag van de schijf, spiraalarmen zien die typisch verklaard worden door twee extra planeten. Hoofdstuk 3 presenteert hogere resolutie ALMA waarnemingen van deze schijf. Wat in eerdere observaties een duidelijke asymmetrische ring leek, is met de hogere resolutie onder te verdelen in een symmetrische ring aan de binnenkant en een gescheiden banaanvormige asymmetrie die geïnterpreteerd kan worden als een werveling. Het lanceerpunt van de spiraalarmen ligt dichtbij het centrum van de asymmetrie (middelste paneel in Fig. 3.1). Wij stellen daarom voor dat deze spiraalarmen ontstaan zijn door de werveling in plaats van door extra planeten. Slecht één planeet, die de binnenste holte creëert, is nodig in deze verklaring. Dit komt overeen met het feit dat ondanks de nodige moeite nog steeds geen enkele planeet geïdentificeerd is in de buitenste regionen van HD 135344B.

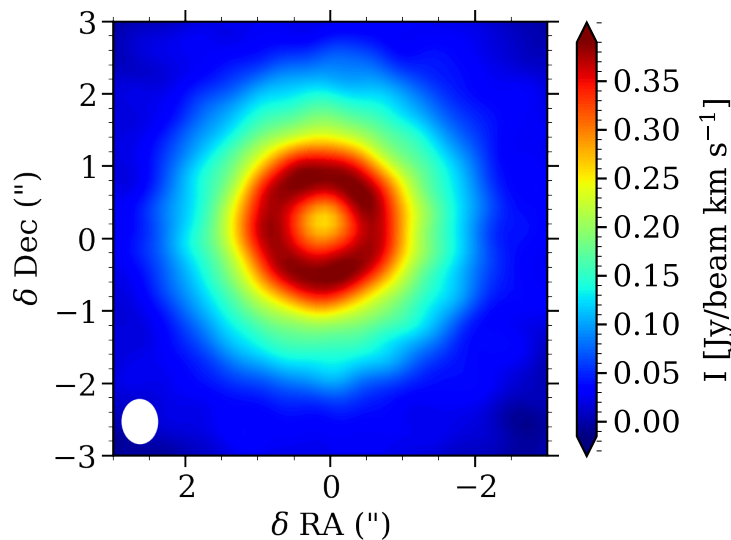


Figure 6.11: De ringvormige CN emissie die gedetecteerd is in de schijf rond TW Hya.

Hoofdstuk 4 presenteert waarnemingen van de schijf rond HD 135344B met een nog hogere resolutie en op een andere golflengte. Deze keer zijn de binnenste ring en de buitenste asymmetrie duidelijk van elkaar te onderscheiden. Bovendien wordt, door het combineren van de nieuwe met de vorige waarnemingen, een onderzoek naar de werveling uitgevoerd op meerdere golflengtes. Hierdoor kunnen vele eigenschappen van de stofdeeltjes in deze werveling worden bepaald. Het is bijvoorbeeld duidelijk dat de stofdeeltjes in de werveling groter zijn dan in de rest van de schijf en dus dat het stof hier tot grotere deeltjes groeit, allicht zelfs tot grootte van planetoiden. De massa van de werveling is ook gemeten; deze is binnen de onzekerheden consistent met de lancering van spiraalarmen vanuit de werveling.

De eerste drie hoofdstukken leggen vooral de focus bij stofstructuren. Hoofdstuk 5 richt zich in plaats daarvan op gas en in het bijzonder op de emissie van CN. Als één van de helderste spectraallijnen in schijven is CN een interessant molecuul om te bestuderen. Wat het nog interessanter maakt is dat ruimtelijk opgeloste waarnemingen van protoplanetaire schijven altijd ringachtige structuren laten zien (zie Fig. 6.17). Komen deze ringen ook door een planeet? Zijn ze gecorreleerd aan stofringen? Om deze vragen te beantwoorden is de CN emissie voor een grid aan modellen van protoplanetaire schijven gesimuleerd

met de DALI code. De conclusie is dat CN altijd ringen vertoont, ook als er geen structuren in de schijf aanwezig zijn. De oorsprong van deze ringen is chemisch. De reactie die leidt tot deze eigenaardige emissie is echter sterk afhankelijk van een aantal eigenschappen van de schijf zoals de dikte, straal, massa en ver-ultraviolet straling van de centrale ster. Als men dus CN waarneemt in protoplanetaire schijven, kunnen de grootte en helderheid van de ring gebruikt worden om deze eigenschappen te bepalen.

Hoofdstuk 6, tenslotte, richt zich op ALMA waarnemingen van stof en gas in niet een enkele schijf, maar in vele schijven in een enkel stervormingsgebied: Corona Australis (CrA), afgebeeld in Fig. 6.15. Men denkt dat CrA een jong stervormingsgebied is en dus werd verwacht dat het relatief grote en heldere schijven zou vertonen vergelijkbaar met andere stervormingsgebieden met dezelfde leeftijd zoals Lupus. Geen enkele schijf is echter gedetecteerd in het gas en de stofschijven lijken minder helder en klein, meer vergelijkbaar met een stervormingsgebied dat 10 keer ouder is dan Lupus, zoals Upper Sco. Nieuwe VLT/X-shooter van de waargenomen objecten lijken hun jonge leeftijd echter te bevestigen. De vraag naar de oorsprong van de lage helderheid blijft onbeantwoord, maar de twee hoofdopties zijn mogelijk: ofwel twee verschillende stervormingsgebeurtenissen met een paar miljoen jaar verschil hebben zich voorgedaan in CrA, ofwel de helderheid en grootte van de schijven zijn sterk beïnvloed door de condities (zoals de rotatie van de wolk) in het vroegste begin van het stervormingsproces. In het bijzonder, als schijven rond de jongste objecten in dit gebied worden geobserveerd en gevonden wordt dat deze minder helder zijn, dan zou het duidelijk zijn dat begincondities een belangrijke rol spelen door al vanaf het begin de schijven kleiner en minder zwaar te maken.

Tot op heden blijft het onduidelijk of de waargenomen structuren komen door reeds gevormde planeten of door een ander fysisch mechanisme. Tot nu toe is er slechts één planeet waargenomen in een schijf, maar toekomstige waarnemingen kunnen mogelijk andere planeten in schijven detecteren die geassocieerd zijn met substructuren. In de tussentijd worden nieuwe veelbelovende methoden om indirect planeten waar te nemen steeds gebruikelijker. Deze zullen essentieel zijn in de nabije toekomst. De verschillen in de beweging van het gas die ontstaan door planeten zijn bijvoorbeeld al in een aantal gevallen waargenomen en kunnen ook voor meer objecten gebruikt worden. Emissie van schijven rond dubbelsterren die geassocieerd wordt met een protoplanet is ook al waargenomen met ALMA en tevens is recent de inval van materiaal op een protoplanet zelfs direct waargenomen met MUSE. Dit soort waarnemingen zullen in de toekomst gebruikelijker worden.

In de tussentijd zullen meer waarnemingen van protoplanetaire schijven op

verschillende golflengtes, zoals hier zijn uitgevoerd voor HD 135344B, informatie geven over de eigenschappen van het stof in stofvallen, met inbegrip van wervelingen. In het bijzonder zou de connectie tussen wervelingen en spiraalarmen in observaties van verstrooid zichtbaar licht beter onderzocht moeten worden in meerdere bronnen, waar we gebruik kunnen maken van de gevoeligheid en ruimtelijke resolutie van ALMA op hogere frequenties.

Dit soort onderzoeken zijn cruciaal om vast te stellen of substructuren in schijven de geboorteplaats zijn van nieuwe planeten. Op den duur zal dit ook duidelijkheid geven over hoe variëteit van substructuren in sub-mm waarnemingen gelieerd is aan de diversiteit in systemen van exoplaneten en uiteindelijk aan onze oorsprong.