



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Ingredients of the planet-formation puzzle: Gas substructures and kinematics in transition discs

Wölfer, L.B.

Citation

Wölfer, L. B. (2023, March 28). *Ingredients of the planet-formation puzzle: Gas substructures and kinematics in transition discs*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3589823>

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/1887/3589823>

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

Ik weet niets met zekerheid,
maar de aanblik van de sterren
doet me dromen.

Vincent van Gogh

Nederlandse samenvatting

Al sinds de vroegste geschiedenis kijkt de mensheid naar de nachthemel gevuld met sterren en vraagt men zich af hoe deze tot stand zijn gekomen. De vraag naar de oorsprong van de aarde en diens plaats in het universum houdt de mensheid al gedurende zijn hele bestaan bezig en heeft uiteindelijk geleid tot de ontwikkeling van telescopen die vele malen verder kunnen kijken dan het menselijk oog. Deze instrumenten worden geleidelijk verbeterd en zorgen er daarmee voor dat wetenschappers alle hoeken van de kosmos in steeds groter detail kunnen bestuderen. Dit brengt ons dichterbij het beantwoorden van dezelfde vragen die al lang geleden gesteld zijn.

Één specifiek interessante vraag is die van de oorsprong van leven. Hedendaags kennen we slechts één plek in het universum waar leven mogelijk is: de aarde. Ongeveer 30 jaar geleden werd echter de eerste planeet in een baan rond een andere ster ontdekt, een zogeheten exoplaneet. Dit heeft de deur geopend naar een nieuw tijdperk in de astronomie waar de mogelijkheid tot leven op andere werelden een realiteit is. Tegenwoordig zijn er meer dan 5000 exoplaneten bevestigd en dit aantal groeit nog elke dag. Statistisch gezien draait er om elke ster één planeet. Ook al zijn planeten gewone inwoners van de kosmos, ze laten een grote diversiteit zien: planeetstelsels laten een grote verscheidenheid zien, zowel in termen van stellaire en planetaire massas als in de structuren van de systemen zoals het aantal planeten, de samenstelling en de distributie in het planeetstelsel.

Om deze grote diversiteit te verklaren en om uiteindelijk de vraag te beantwoorden of er leven mogelijk is op andere planeten moeten we eerst begrijpen hoe planeten worden gevormd, zowel vanuit een fysisch als vanuit een chemisch perspectief. Om dit te bewerkstelligen moeten we naar hun geboorteplekken kijken. Deze bevinden zich in de zogeheten protoplanetaire of planeet-vormende schijven, bestaande uit stof en gas, rond de nieuwgevormde ster. Deze schijven evolueren en vergaan uiteindelijk. De evolutionaire processen bepalen zowel het uiterlijk van de schijven en hoe de planeten zich vormen. Tegelijkertijd hebben vormende planeten interactie met hun omgeving gedurende de groei van kleine stofkorrels tot kiezels, planetesimalen en uiteindelijk rotsachtige planeten en de kernen van gasreuzen, veranderen ze de structuur van hun schijf, en veranderen ze diens evolutionaire pad.

Dit proefschrift focusteert zich op de interpretatie van substructuren in schijf-



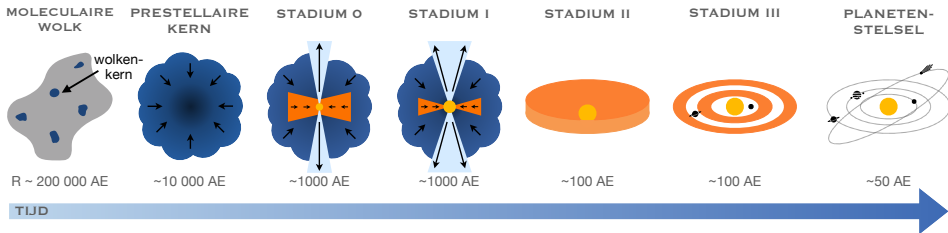
Figuur 1: Afbeelding van de zuilen van creatie, een stervormingsgebied in de Adelaarsnevel, genomen met de James Webb Ruimtetelescoop. Afbeelding van: NASA, ESA, CSA, and STScI.

ven in termen van schijfwinden en planeet-schijf interacties. Het modelleren van dynamische processen in schijven alsmede het karakteriseren van de waargenomen substructuren vormen essentiële stukjes bij het samenstellen van de planeetvormingspuzzel. Dit proefschrift draagt bij aan het begrijpen van hoe algemeen substructuren zijn en of deze bepaalde patronen volgen.

Jonge stellaire systemen

Sterren worden gevormd in langzaam roterende gigantische moleculaire wolken, enorme opeenhopingen van interstellair materiaal dat voornamelijk bestaat uit gas en kleine stofkorrels. Een voorbeeld van zo'n stervormingsgebied is weergegeven in Fig. 1. Onder bepaalde voorwaarden kunnen de meest dichte en koude regio's (kernen) van de wolk ineenstorten onder hun eigen zwaartekracht, resulterend in een verhoging van de dichtheid en de temperatuur en de vorming van een jonge (proto-)ster in het centrum. Tegelijkertijd moet het draaimoment van de wolk behouden blijven en het materiaal met het hoogste draaimoment (dat de nieuwgeboren ster uit elkaar zou laten draaien) verspreidt zich in een circumstellaire accretieschijf waaruit de ster zich de eerste paar miljoen jaar van zijn leven voedt.

De evolutie van jonge stellaire objecten is schematisch weergegeven in Fig. 2. Na het ineenstorten van het centrum van de moleculaire wolk vormt zich een prestellaire kern. Deze stort vervolgens verder ineen tot een protoster omgeven door een ineenstortend omhulsel. Op dit punt wordt er al een schijf gevormd rondom



Figuur 2: Schematisch overzicht van de verschillende stadia van stervorming. De focus van dit proefschrift ligt op de stadium II objecten, ook wel bekend als protoplanetaire schijven. Één astronomische eenheid, ook wel aangeduid met AE, is gelijk aan de gemiddelde afstand tussen de aarde en de zon.

de protoster, maar deze bevindt zich nog diep in de wolk (stadia 0 en I). Gedurende deze stadia verdwijnt het omliggende omhulsel in 100 000 tot één miljoen jaar door accretie van het omhulsel op de schijf en naar buiten vloeiend materiaal totdat er op ten duur een ster met een gasrijke protoplanetaire schijf overblijft die direct kan worden waargenomen (stadium II). In de volgende miljoen tot tien miljoen jaar verdwijnt het materiaal de schijf of wordt het gebruikt om planeten en kleinere objecten te bouwen waardoor er een ster overblijft die omgeven is door een gasarme puinschijf (stadium III). Uiteindelijk verdwijnt de schijf volledig en wordt er een nieuw planetenstelsel zoals ons zonnestelsel geboren. De focus van dit proefschrift ligt op de systemen die zich in stadium II bevinden en de substructuren van het gas welke direct kunnen worden waargenomen met de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA).

Evolutie van de schijf

Een circumstellaire schijf moet zijn draaimoment ofwel verliezen ofwel herdistribueren om te kunnen evolueren. Anders zou het materiaal in de schijf voor eeuwig in dezelfde baan rond de ster blijven draaien. De twee belangrijkste manieren, die elkaar niet uitsluiten, voorgesteld om het draaimoment te verminderen en de evolutie van de schijf te beheersen zijn: schijfwinden en viscositeit. In een schijf die door viscositeit evolueert wordt het draaimoment geherdistribueerd door een wrijvingskracht tussen gas deeltjes die ervoor zorgt dat een deeltje naar binnen beweegt doordat deze draaimoment verliest aan het andere deeltje dat op zijn beurt naar buiten beweegt. De exacte oorsprong van viscositeit blijft nog onbekend en wordt nog actief onderzocht maar turbulentie wordt vaak aangevoerd om evolutie door viscositeit te verklaren. Aan de andere kant brengen schijfwinden een manier om draaimoment uit het systeem te verwijderen zonder dat turbulentie nodig is. In de aanwezigheid van een magnetisch veld kan een magnetisch-aangedreven wind gelanceerd worden van de oppervlakte van de schijf die draaimoment met zich mee draagt. Derhalve moet het materiaal dat in de schijf blijft draaimoment verliezen en beweegt het richting de ster.

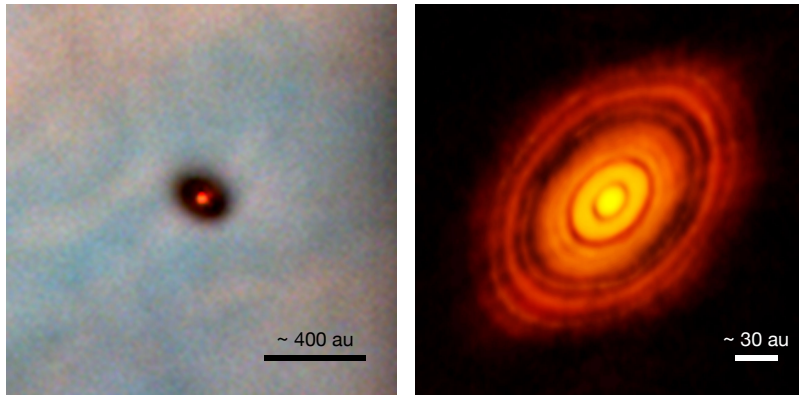
In het simpele beeld van evolutie door viscositeit is het verdwijnen van een

protoplanetaire schijf een langdurig proces waar de schijf gestaag en homogeen vervaagt. Er is echter geen bewijs van zulke langzaam vervagende schijven en dus moet er een alternatieve manier aanwezig zijn om schijven in latere stadia snel te laten verdwijnen. Één manier die mogelijk een rol speelt in het snel laten verdwijnen van schijven is fotoverdamping. Fotoverdamping beschrijft de bestraling van materiaal in de schijf met hoog-energetische stellaire fotonen die de bovenste lagen van de schijf verwarmen tot een hogere energie dan de energie van de zwaartekracht, resulterend in het lanceren van een fotoverdampende wind. Gedurende het grootste deel van de levensduur van de schijf wordt de evolutie gedomineerd door viscositeit en is het verlies van massa door een fotoverdampende wind nihil. Na verloop van tijd nemen de instroom van materiaal op de ster en de oppervlakedichtheid van de schijf echter af en kunnen de fotonen doordringen in diepere lagen van de schijf. Zodra de accretiesnelheden dalen tot onder het verlies van massa door de wind, begint fotoverdamping de evolutie van de schijf te domineren. Naar binnen stromend materiaal wordt door de wind weggeblazen in plaats van dat het op de ster valt, en er ontstaat een ringvormig gat dat de binnenste en buitenste delen van de schijf van elkaar scheidt. Zonder de aanvoer van materiaal uit de buitenste schijf valt het binnenste deel van de schijf snel op de ster en verdwijnt het buitenste deel van de schijf, dat nu direct bestraalt wordt door de ster, snel van binnenuit.

In de context van gaten en holtes in protoplanetaire schijven moet ook de term „overgangsschijf” worden genoemd. Overgangsschijven worden gekenmerkt doordat hun binnendeel compleet ontdaan is van stof (en mogelijk gas). Ze zijn in eerste instantie geïdentificeerd in waarnemingen door de aanwezigheid van een infraroodexces in de spectrale energie distributie van jonge stellaire objecten. Als natuurlijke uitkomst van fotoverdamping werd gedacht dat deze schijven op het punt stonden om te verdwijnen en dat deze daarmee een brug vormden tussen optisch dikke schijven en puinschijven. Vanuit een waarneemperspectief zijn overgangsschijven een diverse groep van objecten en worden ze gekenmerkt door een scala aan substructuren die verschillende vormingsmechanismes suggereren. In het bijzonder kunnen vooral schijven met grote gaten die tegelijkertijd nog heel veel accretie op de ster laten zien moeilijk worden verklaard door fotoverdamping. Planeet-schijf interacties bieden een alternatieve oplossing en in ieder geval van een aantal van de waargenomen gaten in schijven wordt gedacht dat deze resulteren door dynamisch leegruimen door een planeet in plaats van dat deze gaten een evolutionair stadium representeren. Overgangsschijven bieden ons fantastische laboratoria om schijven en planeetvorming te bestuderen en kunnen ons misschien zelfs in staat stellen om planeetvorming in actie te zien. Dit proefschrift besteedt daarom speciale aandacht aan deze intrigerende klasse van objecten.

Waarnemingen van schijven

Tot ongeveer een decennium geleden kon het circumstellaire materiaal niet ruimtelijk worden opgelost vanwege een gebrek aan resolutie van oudere generatie telescopen. Waarnemingen toonden vlakke en gladde structuren die symmetrisch



Figuur 3: Links: optische HST afbeelding van een protoplanetaire schijf in de Orionnevelcluster. Afbeelding van: Mark McCaughrean (MPIA), C. Robert O'Dell (Rice University) en NASA/ESA. Rechts: een ALMA afbeelding van de schijf van HL Tau op mm-golflengten. Afbeelding van: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

rond de centrale ster leken te zijn. Het was pas sinds de opkomst van ALMA en de Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch (SPHERE) op ESO's Very Large Telescope (VLT) dat verbazingwekkende substructuren werden waargenomen (vergelijk Fig. 3).

Het millimeter bereik van het spectrum is bijzonder geschikt om protoplanetaire schijven waar te nemen aangezien het koude moleculaire gas en stof voornamelijk op deze golflengten licht uitzendt en omdat de distributie van het stof gedomineerd wordt door stofkorrels ter grootte van een millimeter. De beste faciliteit om straling met millimeter golflengten waar te nemen is ALMA omdat het de gevoeligheid, spectrale resolutie en het ruimtelijk oplossend vermogen biedt die nodig zijn om individuele schijven in detail in kaart te brengen. Tegelijkertijd heeft ALMA ook studies van grote populaties mogelijk gemaakt. Gecombineerd hebben deze waarnemingen ons geleerd dat protoplanetaire schijven gekenmerkt worden door een grote variëteit in substructuren zoals gaten en holtes, ringen, spiraalarmen en azimuthale asymmetrieën. Dit proefschrift richt zich op het gas in schijven, wat als voordeel heeft dat het informatie geeft over de schijfdynamica of kinematica: moleculaire lijn emissie van roterend gas is rood- of blauwverschoven afhankelijk van of de geprojecteerde snelheid van ons af of naar ons toe is gericht.

Schijfkinematica

Het ultieme doel is om planeten in schijven direct waar te nemen en zo de link met waargenomen substructuren te bevestigen, maar de dichte en ondoorzichtige omgeving rondom jonge planeten maakt dit moeilijk. Het is dus geen verrassing dat de enige tot nu toe robuust gedetecteerde jonge planeten zich bevinden in het PDS 70 systeem. Er zijn daarom indirecte detectietechnieken bedacht en één veelbelovende techniek is om het snelheidsveld van het roterende gas te bestuderen

met waarnemingen van moleculaire lijnen. Het zoeken naar afwijkingen van Kepleriaanse rotatie kunnen zo gebruikt worden om te begrijpen welke processen, die elk hun eigen voetafdruk achterlaten in de kinematica, de schijf zijn vorm geven. De kinematische kenmerken die worden veroorzaakt door planeet-schijf interacties zijn specifiek interessant aangezien de amplitude en morfologie van deze verstoringen afhankelijk zijn van de positie en de massa van de planeet, maar ook van de structuur van de schijf. Ook al zijn meerdere waarnemingen van kinematische afwijkingen zoals niet-Kepleriaanse spiraalarmen, meridionale stromen of knikken in verband gebracht met de aanwezigheid van planeten blijft het moeilijk om deze te onderscheiden van andere onderliggende mechanismes. Om de individuele bijdragen beter te begrijpen zijn speciale modelleer inspanningen nodig in combinatie met uitzonderlijk gevoelige waarnemingen met een hoge spectrale resolutie en ruimtelijk oplossend vermogen. Zulke waarnemingen komen met hoge kosten qua waarnemtijd en daarom is er slechts een beperkt aantal bronnen waarvoor de kinematica in detail bestudeerd is. Het veld van kinematica staat dus nog in zijn kinderschoenen maar brengt de mogelijkheid om jonge en nog steeds vormende planeten te vinden die niet zijn waar te nemen met klassieke methodes. De eigenschappen van deze planeten leveren belangrijke conclusies voor planeetvorming en migratiemodellen, en de tijdschalen van deze processen helpen om ze te linken aan de eigenschappen van de populatie van reeds gevormde exoplaneten.

Dit proefschrift

In dit proefschrift wordt het gas in protoplanetaire schijven en diens substructuren bestudeerd in de context van zowel schijfwinden als planeet-schijf interacties. De variëteit in waargenomen substructuren, in combinatie met het ontbreken van direct waargenomen planeten in schijven, heeft geleid tot de volgende hoofdvragen die in dit proefschrift worden behandeld:

1. Zijn de diverse substructuren zoals waargenomen in schijven het resultaat van planeet-schijf interacties of van andere mechanismes?
2. Als ze veroorzaakt worden door planeten, wat kunnen dan leren over deze planeten, bijvoorbeeld in termen van positie of massa, en wat kunnen we leren over de schijf als ze niet veroorzaakt worden door planeten?
3. Wat drijft het transport van draaimoment in de schijf en het verdwijnen van de schijf, hetgeen de levensduur beïnvloedt en dus de tijd om planeten te bouwen?

De volgende paragrafen bieden een korte samenvatting van alle hoofdstukken en hun belangrijkste resultaten.

Hoofdstuk 2 onderzoekt we de effecten van verdamping via röntgenstraling van protoplanetaire schijven die arm zijn in koolstof in de gasfase, een eigenschap die vaak wordt waargenomen. Aangezien koolstof één van de belangrijkste bijdragen levert aan de opaciteit in het röntgengolflengtegebied kan verwacht worden dat

koolstofarm gas ervoor zorgt dat röntgenstraling dieper in de schijf kan penetreren. Onderzocht wordt hoe dit de sterkte van het fotoverdampende massaverlies en de vorming van holtes beïnvloedt. Hiervoor worden berekeningen van stralingsoverdracht en hydrodynamische modellen van schijven die worden bestraald door interne röntgen en extreem-ultraviolette straling voor verschillende maten van koolstofverarming gecombineerd. De resultaten laten zien dat fotoverdampende winden sterker zijn voor zulke koolstofarme schijven vergeleken met schijven met evenveel zware elementen als de zon. Dit resulteert in verhoogd massaverlies dat zich uitstrekt tot grotere stralen. Deze resultaten kunnen een groter aantal waargenomen overgangsschijven verklaren. Tevens kan het extreem koolstofarm zijn van het gas een mechanisme zijn om de schijf snel te laten verdwijnen tegen het einde van diens levensduur.

Hoofdstuk 3 presenteert hoge-resolutie Band 6 ALMA waarnemingen van de circumstellaire schijf rond CQ Tau. Drie CO isotopologen, ^{12}CO , ^{13}CO en C^{18}O , zijn geanalyseerd in termen van zowel hun kinematica als hun helderheidstemperatuur. Door het fitten van een Kepleriaans schijfmodel aan het snelheidveld hebben wordt gezocht naar zowel afwijkingen van Kepleriaanse rotatie als variaties in de temperatuurstructuur. De resultaten laten een significante spiraalstructuur zien in de residuen van zowel de snelheid als de gas temperatuur nadat het model van de data is afgetrokken. De snelheid- en temperatuur spiralen komen deels met elkaar overeen wat een gemeenschappelijke oorsprong suggereert. Hun morfologie, aantal en hellingshoeken ondersteunen een dynamisch vormingsscenario. Tezamen met de (bijna overeenkomende) spiralen in nabij-infrarode waarnemingen en een diep gas en stof holte suggereren ze dat een massief lichaam zoals een planeet of een tweede ster aanwezig is binnen ongeveer 25 AE.

In hoofdstuk 4 wordt de analyse van gas kinematica en helderheidstemperaturen zoals uitgevoerd in het vorige hoofdstuk uit naar 36 overgangsschijven met grote holtes uitgebreid, waarmee de beschikbare ALMA waarnemingen tot het uiterste worden gedreven. Voor de analyse worden CO data uit het archief gebruikt die zijn waargenomen in verschillende cycli in Band 6 en Band 7. Voor het eerst worden voor een groot aantal bronnen de substructuren zoals gevonden in de kinematica en temperatuur residuen vergeleken met andere indicatoren voor de aanwezigheid van planeten. De resultaten leveren sterke structuren zoals bogen en spiralen op in 20 % van de bronnen die mogelijk geassocieerd kunnen worden met de aanwezigheid van planeten of tweede sterren, terwijl de meeste bronnen geen sterke structuren laten zien. Bijna alle schijven die spiralen tonen in waarnemingen van verstrooid licht op nabij-infrarode golflengten laten hiervoor ook indicaties zien in de CO data.

Hoofdstuk 5 presenteert een onderzoek met meerdere spectraallijnen van de schijf rondom de Herbig ster HD 100546, een bijzonder interessant systeem in termen van planeet-schijf interacties. Voor de analyse worden ALMA waarnemingen in Band 6, 7 en 10 met hoge spectrale resolutie en hoog ruimtelijk oplossend vermogen van meerdere lijnen van CO gebruikt. Om deze lijn-emissie te modelleren voor elke snelheidsdataset wordt gebruik gemaakt een kanaal-kaart fitting pakket. De analyse laat uitgerekte spiraalstructuren zien in de kinematische residuen van alle lijnen en hun morfologie wordt goed gereproduceerd door lineaire en logarit-

mische functies. Ze komen overeen met spiralen die worden aangedreven door een ingebedde planeet binnen 50 AE. Aanwijzingen voor een tweede compagnon die zich verder weg bevindt op een afstand van 90-150 au zijn te zien als meridionale stromen richting het middenvlak van de schijf en drukminima, alsmede in een mogelijk gat in de meer optisch dunne moleculen. Een asymmetrie in de emissiehoogtes van de blauw- en roodverschoven kant van de schijf kan een indicatie zijn van invallend materiaal aan de roodverschoven zijde of een kromgetrokken binnenschijf, die een schaduw over het buitenste deel van schijf werpt.

Toekomstperspectief

ALMA heeft onze kijk op planeetvormende schijven getransformeerd en een schat aan substructuren blootgelegd. We zijn echter nog maar net begonnen om de verschillende mechanismen die een rol spelen van elkaar te onderscheiden. De oorsprong van de substructuren blijft een belangrijke open vraag. Tegelijkertijd hebben we nu een tijd bereikt waarin zowel met ALMA als met JWST nieuwe en spannende nieuwe mogelijkheden ontstaan door de hoge gevoeligheid en resolutie van deze telescopen die alle eerdere waarnemingen overtreffen.

ALMA waarnemingen van moleculaire gasemissie hebben het voordeel dat we de gasstroom door de schijf heen in kaart kunnen brengen, en met voldoende gevoeligheid en resolutie opent dit een unieke nieuwe manier om planeten in de schijf te detecteren en fysische processen te onderzoeken. Het veld van schijfkinematica is pas recent ontstaan en zeer diepe lijnwaarnemingen zullen ons in staat stellen om ook planeten met een kleinere massa in kortere banen om hun ster te detecteren.

Een ultiem doel is om de eigenschappen van schijven en hun jonge planeten te koppelen aan de zeer diverse populatie van volwassen exoplaneten. Daarom zijn systematische en uitgebreide programma's voor een groot aantal schijven nodig, waaronder ook de kleinere schijven waarvan algemeen wordt aangenomen dat ze minder gestructureerd zijn, als complement voor de massieve en heldere schijven die doorgaans in detail worden bestudeerd. Dit is een essentiële stap om te begrijpen of er systematische verschillen zijn tussen deze groepen en of met name Herbig Ae/Be of T Tauri schijven verschillende patronen volgen. Tot nu toe hebben kinematische studies zich vooral gericht op de helderdere CO lijnen, maar om de mechanismen achter de waargenomen substructuren echt te ontrafelen is het van cruciaal belang om ze over de volledige radiële en verticale omvang van de schijf te bestuderen. Dit vereist waarnemingen van veel verschillende moleculen die op hun beurt ook de mogelijkheid bieden om de chemische kenmerken van vormende planeten te begrijpen.

Om de waarnemingen te begrijpen is ook fundamenteel onderzoek nodig vanuit een theoretisch perspectief. Toegewijde modellen zijn nodig om te begrijpen welke afdrucken planeet-schijf interacties of andere schijfvormende mechanismes zoals schijfwinden en gravitatie-instabiliteiten zullen achterlaten in de kinematica of temperatuurstructuren. Dit is cruciaal om te begrijpen welke rol de verschillende processen spelen in de planeetvormingspuzzel en zal ons helpen om te bepalen welke schijven het meest geschikt zijn om directe afbeeldingen van te maken met

JWST en de toekomstige Extremely Large Telescope (ELT). Samen met ALMA zullen deze baanbrekende faciliteiten ons in staat stellen om de verbinding te leggen tussen de van binnenste en buitenste schijfstructuren, wat hedendaags nog niet volledig worden begrepen, en de weg vrij te maken voor een uitgebreide karakterisering van de jongste exoplaneten.

