



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Mining the kinematics of discs to hunt for planets in formation

Izquierdo Cartagena, A.F.

Citation

Izquierdo Cartagena, A. F. (2023, December 1). *Mining the kinematics of discs to hunt for planets in formation*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3665447>

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/1887/3665447>

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

Nederlandse samenvatting

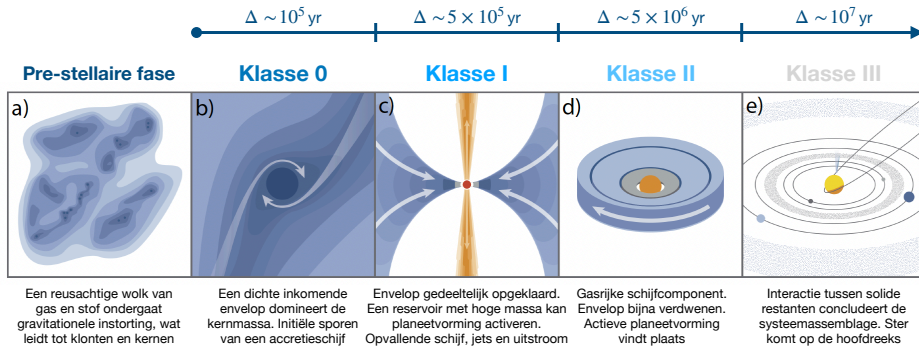
Sinds mensenheugenis zijn wij nauw verbonden met de nachtelijke hemel in een zoektocht naar antwoorden op de betekenis van ons bestaan, die tot op de dag van vandaag voortduurt. Sterker nog, modern astronomisch onderzoek, voortbouwend op eeuwen van wetenschappelijke vooruitgang, geeft ons onschatbare inzichten in de vorming en evolutie van sterrenstelsels, sterren en planeten, waardoor we dichter bij het begrijpen van de mechanismen achter onze oorsprong komen. Dit proefschrift richt zich op een specifiek aspect van dit verhaal: de studie van gasrijke protoplanetaire schijven, de geboorteplaatsen van planeten, met als doel de vingerafdrukken te detecteren van reuzenplaneten die zich nog aan het vormen zijn in deze omgevingen.

Het ontstaan van reuzenplaneten zoals Jupiter en Saturnus speelt een cruciale rol in de evolutie van protoplanetaire schijven. Deze objecten hebben het potentieel om de verdeling van essentiële materialen die nodig zijn voor de vorming en samenstelling van andere planeten, zoals de onze, te beïnvloeden en de banen en fysieke kenmerken van het toekomstige planetenstelsel als geheel te reguleren. Voordat we ons verdiepen in de complexiteit van het detecteren van jonge planeten, laten we kort onze huidige kennis van stervorming verkennen en nader kijken naar de dynamische eigenschappen van de schijven waar planeten hun reis beginnen.

Vorming van sterren en schijven

In onze huidige Melkweg ontstaan stellaire kraamkamers als gevolg van de gravitationele fragmentatie van gigantische moleculaire wolken, een proces dat wordt gereguleerd door de energie die wordt ingebracht door andere sterren en de invloed van magnetische velden binnen het interstellair medium. Deze fragmentatie verloopt op een hiërarchische manier, beginnend met de vorming van massieve klonten die onder specifieke omstandigheden van voldoende dichtheid en lage temperatuur verder fragmenteren tot kleinere gravitationeel gebonden kernen die de embryonale fase van sterren en planetaire systemen vertegenwoordigen.

De evolutie van protostellair kernen volgt doorgaans goed gedefinieerde stadia, vooral wanneer hun massa binnen het lagere bereik valt, waarbij als lager wordt beschouwd minder dan acht keer de massa van onze zon. Astronomen hebben empirische criteria vastgesteld om deze objecten te categoriseren, die afhangen



Figuur 1: Schematische weergave van het vormingspad van lage-massa sterren (aangepast van Öberg & Bergin 2021).

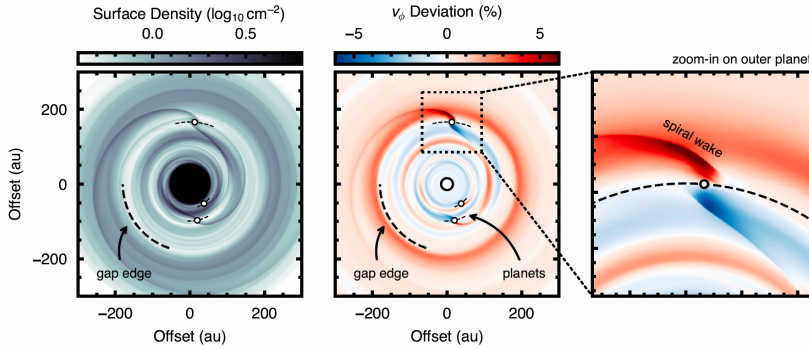
van waarneembare eigenschappen die verband houden met de verdeling van stof rond de protoster. Dit is indicatief voor de leeftijd van het systeem en wordt beoordeeld aan de hand van de analyse van de spectrale energiedistributie van de stofemissie bij nabije en mid-infrarood golflengten. Figuur 1 toont de verschillende evolutie stadia die worden doorlopen door een jong object met lage massa.

Naarmate het omhulsel rondom de protoster afvlakt en geleidelijk wordt uitgeput, hetzij door accretie op de ster of door verdrijving uit het systeem via straalstromen, wordt de dominante circumstellair structuur de protoplanetaire schijf, die gedurende enkele miljoenen jaren aanhoudt (aangeduid als een Klasse II-object in Fig. 1). Gedurende deze uitgebreide periode hebben planeten voldoende tijd om te vormen door accretie- en coagulatiemechanismen—een idee dat even oud is als de oernevel hypothese voorgesteld door Immanuel Kant en Pierre-Simon Laplace in de achttiende eeuw om de oorsprong en evolutie van ons zonnestelsel te verklaren, maar dat alleen kan worden getest met de theorieën en instrumenten van vandaag.

De zoektocht naar planeten-in-wording die in deze scriptie wordt onderzocht, concentreert zich op de detectie van kinematische verstoringen veroorzaakt door planeten die zijn ingebed in jonge schijven. Voordat we echter naar deze kenmerken kunnen zoeken, is het essentieel om de dynamische structuur van schijven in hun onverstoorte toestand te begrijpen.

Dynamische structuur van schijven waarin planeten gevormd worden

De structuur en dynamiek van schijven waarin planeten worden gevormd, worden beïnvloed door de wisselwerking tussen het evenwicht van gravitationele en drukkrachten en het transport van impulsmoment dat nodig is om de accumulatie van materiaal op de centrale ster mogelijk te maken. In goede benadering is de rotatiesnelheid van een protoplanetaire schijf voornamelijk bepaald door de wetten van Kepler, omdat deze voornamelijk reageert op de massa van de ster, met een diffe-



Figuur 2: Momentopname uit een simulatie van interactie tussen planeet en schijf, waarbij de oppervlakedichtheid (links) en de percentage-afwijkingen van kepleriaanse beweging (midden) worden geïllustreerd als gevolg van de aanwezigheid van planeten met de massa van Jupiter. Spiralen en lege ruimtes zijn typische resultaten van de getijdeninteractie tussen schijven en planeten. Credits: Disk Dynamics Collaboration et al. (2020).

rentiële modulatie langs de verticale richting als gevolg van drukondersteuning,

$$v_{\phi}(R, z) = \sqrt{\frac{GM_{\star}}{(R^2 + z^2)^{3/2}}} R, \quad (5.1)$$

In feite zijn drukkrachten niet beperkt tot de verticale richting, maar oefenen ze ook invloed uit in radiale richting. Deze radiale drukcomponent werkt meestal van binnenuit naar buiten, in tegengestelde richting van toenemende temperatuur- en dichtheidsgradiënten.

In praktische termen betekent dit dat een afnemende drukgradiënt ervoor zorgt dat materiaal rond de ster roteert met een sub-kepleriaanse snelheid, en dit gebeurt op een meer uitgesproken manier op grotere radiale afstanden waar de dikte van de schijf toeneemt. Aangezien dit effect azimuthaal symmetrisch is en meestal een klein percentage van de rotatie van de schijf vertegenwoordigt (normaal gesproken < 5%), worden externe kinematische verstoringen, zoals die veroorzaakt door ingebedde planeten, meestal gezocht in de vorm van spiralen of sterk gelocaliseerde afwijkingen van de kepleriaanse beweging (zie Figuur 2). Desalniettemin is het, voordat we naar deze verstoringen kunnen zoeken, noodzakelijk om een nauwkeurig begrip te hebben van waar we naar op zoek zouden moeten zijn en hoe we deze informatie kunnen extraheren uit het licht dat wordt uitgestraald door schijven, wat uiteindelijk is wat onze telescopen vastleggen.

Waarnemingen van schijven en de zoektocht naar jonge planeten

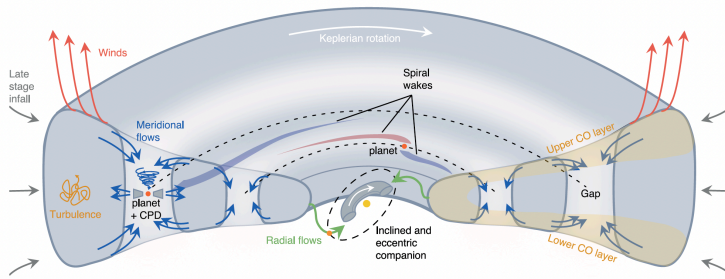
Het eerste directe bewijs van een circumstellaire schijf dateert uit de jaren 1980 met de ontdekking van een afgeplatte structuur rond de jonge ster HL Tau, dank-

zij hoogwaardige millimetergolf-interferometrie. Deze waarnemingen onthulden een gascomponent in ^{13}CO -emissie die Kepleriaanse beweging volgde en dus indicatief was voor roterend materiaal gedomineerd door de gravitatiepotentiaal van de ster. In de daaropvolgende decennia hebben vooruitgang in observatoria op zowel de grond als in de ruimte ons begrip van protoplanetaire schijven en de processen die hun evolutie sturen, aanzienlijk uitgebreid. Met name de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), werelds belangrijkste instrument in zijn soort op het moment van het schrijven van deze scriptie, heeft het veld van planeetvorming aanzienlijk vooruitgeholpen in het afgelopen decennium. Zo heeft ALMA's uitzonderlijke resolutie en gevoeligheid opmerkelijke substructuren onthuld in de stofverdeling van talloze protoplanetaire schijven, wat inzicht biedt in de aanwezigheid van planeten en hun fysieke eigenschappen. Bovendien heeft ALMA gedetailleerde tomografie van de fysische en dynamische structuur van schijven mogelijk gemaakt door gelijktijdige waarnemingen van moleculaire lijnen die zijn uitgezonden door verschillende chemische verbindingen aanwezig in de schijven. Het is dit soort gegevens waarop dit proefschrift is gebaseerd om te zoeken naar de kinematische vingerafdrukken die worden gedreven door planeten in schijven.

Deze benadering wordt gemotiveerd door het feit dat het direct detecteren van jonge planeten geen gemakkelijke taak is vanwege de hoge extinctie die wordt opgelegd door de protoplanetaire schijf zelf. PDS 70 is momenteel het enige systeem waarin vormende planeten rechtstreeks zijn waargenomen via nabij-infrarode en $\text{H}\alpha$ -emissie met behulp van geavanceerde instrumenten op de Very Large Telescope (VLT). Dit is mede mogelijk gemaakt door het feit dat deze objecten zich bevinden in gebieden van de schijf die vrij zijn van verhullend materiaal. Andere mogelijke kandidaten zijn gemeld in de schijven van HD 169142 en AB Aur, maar hun detectie wacht op bevestiging. De VLT heeft ook met succes afbeeldingen gemaakt van planeten die jonge sterren omcirkelen zoals Beta Pictoris en HD 95086, maar deze systemen zijn al in het (latere) stadium van puinringen, waarin het meeste van het oorspronkelijke materiaal voor planeetvorming is verdwenen of door de ster is opgenomen, en ze bieden dus beperkte inzichten in het planeetvormingsproces. Als zodanig bieden indirecte benaderingen zoals die in dit proefschrift worden onderzocht, een veelbelovend alternatief om deze beperkingen te omzeilen.

Vingerafdrukken van planeet-schijf interactie

De analytische theorie van door planeten veroorzaakte verstoringen in de schijfdynamiek kan worden herleid tot baanbrekende werken uit de jaren 1970 en 1980, terwijl de wiskundige basis ervan al was vastgesteld in de studie van getijdeninteracties tussen sterrenstelsels en hun sterren, die verantwoordelijk zijn voor de vorming van spiraalarmen. Hetzelfde fysische concept is van toepassing op een planeet ingebed in een schijf. Zo'n planeet oefent gravitationele koppels uit in zijn directe omgeving, wat leidt tot spiraalvormige dichtheidsgolven met een amplitude die afhankelijk is van de massa van de planeet en de thermodynamische eigenschappen van de schijf. Deze vroege studies benadrukten al de aanzienlijke invloed die de getijdeninteractie van planeten met schijven kan hebben op fundamentele eigenschappen van planeten, zoals massa, baan locatie en samenstelling.



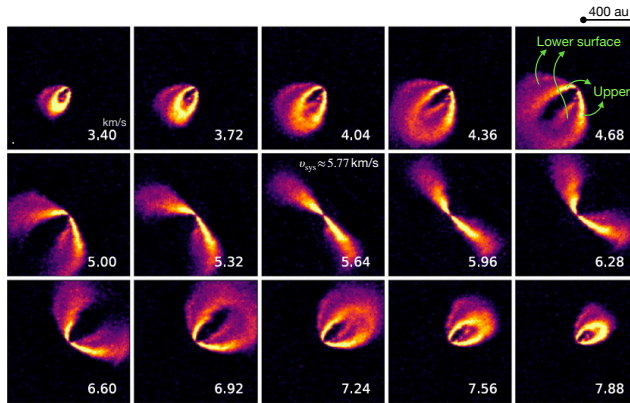
Figuur 3: Schematische samenvatting van de belangrijkste verwachte vingerafdrukken van planeet-schijfinteractie in gasschijven. Ook zijn andere processen die verband houden met de evolutie van de schijf aangegeven, zoals late-fase instroom vanuit het overblijvende omhulsel en winden. Credit: Pinte et al. (2023).

Bovendien benadrukten ze dat de wisselwerking tussen planeet-schijf en de inherente dissipatieve krachten in de gasschijf mogelijk de evolutie van de schijf kan reguleren en bijgevolg de accretie van materiaal op de protoster.

In de afgelopen twee decennia hebben numerieke modellen het veld aanzienlijk vooruitgeholpen door inzicht te verschaffen in hoe dichtheids- en snelheidsverstoringen die door planeten worden veroorzaakt, zich manifesteren onder invloed van verschillende fysische mechanismen, rekening houdend met realistische temperatuur- en dichtheidsstructuren en gemotiveerd door waarnemingsgegevens. Figuur 3 geeft een samenvatting van enkele verwachte signaturen van planeet-schijfinteractie volgens de theorie. Deze vingerafdrukken omvatten asymmetrische gaten uitgehouwen door de planeet, die waarneembare azimuthale en meridionale stroomsnelheden kunnen veroorzaken, en niet-asymmetrische kenmerken zoals grootschalige spiraalgolven en afwijkingen van de kepleriaanse beweging gelokaliseerd in de directe omgeving van de planeet.

Voordat deze signaturen echter kunnen worden geïnterpreteerd en toegeschreven aan de aanwezigheid van planeten, is het essentieel om hun observationele tegenhangers te begrijpen. De telescoop, in dit geval ALMA, observeert niet direct het snelheidsveld van de schijf, maar detecteert eerder emissie van de gas- en stofcomponenten ervan. Figuur 4 illustreert het intensiteitspatroon van de ^{12}CO $J = 2 - 1$ lijnemissie van de schijf rond HD 163296, zoals waargenomen door ALMA, bij verschillende snelheden geprojecteerd langs de gezichtslijn van de telescoop. Het patroon van de emissie in elk snelheidskanaal is het gevolg van een combinatie van factoren, waaronder de quasi-Kepleriaanse rotatie van de schijf, de inclinatie en de verticale structuur.

Wanneer een planeet een lokale verstoring veroorzaakt in de rotatie van de schijf wijkt de snelheid van het nabijgelegen gas af van het verwachte kepleriaanse gedrag. Als gevolg daarvan zou de emissie van dit gas te zien zijn in aangrenzende snelheidskanalen, wat leidt tot waarneembare kronkels in de geprojecteerde intensiteit van de moleculaire lijn. Dit fenomeen werd voor het eerst geïdentificeerd in de schijf van HD 163296, zoals afgebeeld in Figuur 5. Dit markeerde het begin



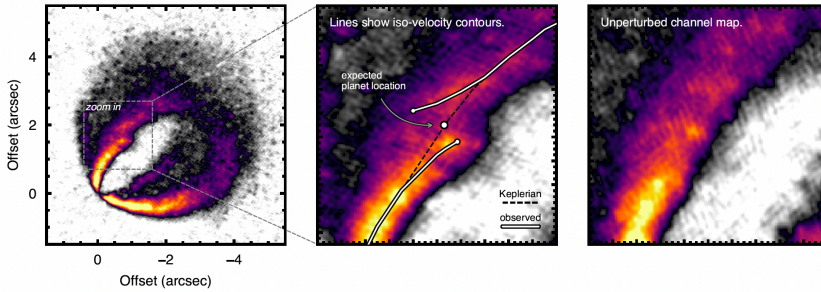
Figuur 4: Deze figuur illustreert het intensiteitspatroon van de HD 163296 schijf zoals waargenomen met ALMA in de $^{12}\text{CO } J = 2 - 1$ lijnemissie (aangepast van Isella et al. 2018). Het patroon van de emissie in elk snelheidskanaal is het resultaat van een combinatie van factoren, waaronder de quasi-Kepleriaanse rotatie van de schijf, de inclinatie en de verticale structuur.

van een nieuwe methode voor het detecteren van jonge planeten nog ingebed in de schijf. De auteurs van deze baanbrekende studie toonden aan dat, onder bepaalde aannames over de fysische structuur en viscositeit van de schijf, deze intensiteitskronkel kon worden gereproduceerd door aan te nemen dat er een reuzenplaneet was met een massa twee keer die van Jupiter, op een straal van 260 astronomische eenheden (één astronomische eenheid is de gemiddelde afstand tussen de aarde en de zon). Sindsdien zijn vergelijkbare studies die intensiteitskronkels in verband brengen met de aanwezigheid van planeten steeds gebruikelijker geworden in waarnemingen met hoge resolutie met ALMA. Deze proliferatie heeft echter ook vragen opgeworpen over welke van deze kronkels daadwerkelijk te wijten zijn aan lokale verstoringen in de snelheid en inderdaad kunnen worden toegeschreven aan planeten. Een van de doelstellingen van dit proefschrift is om een kwantitatieve methodologie te ontwikkelen om te besluiten of deze signatuur inderdaad te wijten is aan lokale verstoringen door planeten op een statistisch robuuste manier of te verwerpen.

Dit proefschrift

Terwijl het vakgebied van de detectie van jonge planeten zich richt op het verkrijgen van diepe beelden van planeetvormende schijven, blijken verstoringen in intensiteitskaarten regelmatig voor te komen. Dit roept de vraag op: hoe betrouwbaar zijn deze kenmerken en welke kunnen we met vertrouwen toeschrijven aan planeet-schijfinteracties? Dit proefschrift richt zich op het ontwikkelen en toepassen van een nieuwe statistische methodologie om kinematische vingerafdrukken te identificeren die worden gedreven door planeten in schijven.

Hoofdstuk II presenteert het analysekader, genaamd DISCMINER, dat is ontwor-



Figuur 5: Eerste intensiteitskronkel gemeld in een protoplanetaire schijf die geassocieerd werd met een ingebedde planeet (Pinte et al. 2018b). De kronkel werd waargenomen met ALMA, in ^{12}CO emissie van de schijf van HD 163296, en is het resultaat van significante afwijkingen van kepleriaanse rotatie die worden toegeschreven aan de aanwezigheid van een planeet met een massa van $2 M_{\text{Jup}}$. De figuur laat ook een onverstoorde kanaal zien aan de andere kant van de schijf (en omgedraaid voor een betere vergelijking) om het intensiteitspatroon te illustreren dat wordt verwacht van een soepele rotatie. Credits: Disk Dynamics Collaboration et al. (2020).

pen om de intensiteit van moleculaire lijnen van protoplanetaire schijven te modelleren en de onderliggende verstoringen van het snelheidsveld te onderzoeken. In dit hoofdstuk wordt de methode getest met behulp van numerieke simulaties van planeet-schijfinteracties. Door naar lokale afwijkingen van kepleriaanse rotatie te zoeken, vindt de methode nauwkeurig zowel de straal als de azimuthale locatie van ingebedde planeten met massa's als Saturnus en Jupiter. Dit hoofdstuk benadrukt dat piek snelheidsverstoringen sterk en coherent zijn in de buurt van planeten, en dient als een kwantitatief criterium voor planeetdetectie.

Hoofdstuk III past de DISCMINER-methode toe op ALMA-waarnemingen van de schijf van HD 163296, waar de eerste intensiteitskronkel werd geïdentificeerd en in eerdere artikelen werd gekoppeld aan de aanwezigheid van een reuzenplaneet. Dit hoofdstuk onthult dat de kronkel het gevolg is van zowel een lokale snelheidsverstoring als een uitgebreide spiraalstructuur, wat verdere ondersteuning biedt voor het bestaan van een massieve planeet in een wijde baan binnen deze schijf. Bovendien meldt dit hoofdstuk de ontdekking van een nieuwe kandidaat- Jupiter-massa planeet, die dichterbij is gelegen, en is geassocieerd met een lokale snelheidsverstoring in het midden van een gat in de oppervlakedichtheid van de schijf.

Hoofdstuk IV breidt de zoektocht naar planeten uit naar verschillende schijven en moleculaire tracers waargenomen met ALMA, waarbij opvallende substructuren tegelijkertijd worden waargenomen in de snelheid, lijnbreedte en intensiteitsvelden in een driedimensionaal beeld. In dit hoofdstuk worden opnieuw lokale verstoringen in de schijf rond HD 163296 geïdentificeerd, mogelijk veroorzaakt door onzichtbare reuzenplaneten, niet alleen in afwijkingen van kepleriaanse beweging, maar ook als versterkte lijnbreedtes, die zich uitstrekken over een breed scala van hoogtes. De schijven van MWC 480 en AS 209 vertonen ook aanwijzingen voor planeet-schijfinteractie, maar in plaats van lokaal te zijn, worden ze gekenmerkt

door grootschalige snelheids- en lijnbreedte-substructuren.

Hoofdstuk V introduceert een verbeterde methodologie voor het detecteren van gas-substructuren en mogelijke door planeten veroorzaakte vingerafdrukken in schijven die zijn waargenomen met zeer hoge snelheidsresolutie in de context van het exoALMA-grootschalige programma. Voortbouwend op de lessen van de eerdere hoofdstukken, verbetert het de precisie van de extractie van het snelheidsveld en de methodologie om zowel lokale als grootschalige substructuren te identificeren, geïllustreerd voor de schijven van HD 135344B, LkCa 15 en MWC 758. Dit hoofdstuk concludeert dat er sterke aanwijzingen zijn voor getijdeninteracties tussen deze schijven en reuzenplaneten en stelt mogelijke planeetlocaties voor op basis van snelheids- en lijnbreedteverstoringen die zijn geïdentificeerd via moleculaire lijntomografie.

Toekomstperspectieven

Het karakteriseren van moleculaire lijnwaarnemingen die al dan niet de aanwezigheid van planeten in schijven aanduiden is momenteel een grote uitdaging in het veld. Hoewel dit proefschrift een solide basis heeft ontwikkeld voor het identificeren van planeet-schijfinteracties, is het waarschijnlijk dat planeten samengaan met diverse andere fysische processen, zoals zwaartekracht- en magneto-hydrodynamische instabiliteiten, die ook verstoringen kunnen veroorzaken met vergelijkbare groottes als die verwacht van planeten. Om planetaire vingerafdrukken ondubbelzinnig te identificeren, zijn systematische studies nodig waarin meer complexe scenario's worden overwogen die deze mechanismen omvatten naast planeten.

Natuurlijk is deze taak computertechnisch veeleisend en vereist overweging van factoren zoals variaties in de fysische structuur van de schijf, eigenschappen van planeten en de effecten van observationele parameters. Echter, geavanceerde methoden op basis van kunstmatige intelligentie winnen terrein in het veld en kunnen aanzienlijk bijdragen aan de kwantitatieve classificatie van belangrijkewaarnemingen van planeten.

Op het gebied van waarnemingen zijn al significante vooruitgangen in directe beelden van planeten in opkomst dankzij de ongeëvenaarde gevoeligheid van instrumenten zoals JWST en MagAO-X. Bovendien zal de in aanbouw zijnde Extremely Large Telescope (ELT), met zijn opmerkelijke ruimtelijke resolutie, essentieel zijn voor het begrijpen van planeetvorming binnen enkele astronomische eenheden van schijven, waar planeten zoals de aarde zich vormen en evolueren. Met name de Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph (METIS) zal de mogelijkheden van ALMA aanvullen, en biedt hoogwaardige beelden van deze warme binnenste regio's. METIS zal ook helpen bij het identificeren van thermische emissie van jonge planeten en indicaties van accretie rond Jupiter-achtige planeten op een breed scala van orbitale afstanden. Vanuit een kinematisch perspectief zal METIS ons in staat stellen om de dynamiek van het binnenste deel van schijven te verkennen door de studie van ro-vibratie CO-lijnen, die op een vergelijkbare manier kunnen worden aangepakt met de methodologieën die in dit proefschrift worden gepresenteerd met als doel planeten te detecteren en hun vormingsomgeving te karakteriseren.