Universiteit Leiden
The Netherlands

Unveiling the third dimension: vertical structure as a probe of planet formation conditions

Paneque Carreño, T.

Citation

Paneque Carreño, T. (2024, September 13). *Unveiling the third dimension: vertical structure as a probe of planet formation conditions*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/4083418

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/1887/4083418

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

Nederlandse samenvatting

In het noorden van Chili biedt de Atacama-woestijn, door de natuurlijke omstandigheden op die plek en de isolatie van de buitenwereld, een unieke mogelijkheid om het universum te observeren. Gedurende vele eeuwen keken de lokale inheemse volken, die in hun taal *Lickan Antay* worden genoemd en in het huidige Spaans *Atacameños*, naar de sterrenhemel en concentreerden zich niet alleen op de heldere sterren maar ook op de donkere gebieden die contrasteerden met de heldere achtergrond. We weten nu dat deze regio's donker zijn omdat kleine stofdeeltjes het zichtbare sterlicht absorberen en dat deze donkere wolken worden geassocieerd met stervormingsgebieden. Terwijl onze ogen niet in staat zijn om door het stof te kijken, kunnen instrumenten zoals de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) hun geheimen onthullen. ALMA is gebouwd op het Chajnantorplateau, een heilige plaats voor de *Lickan Antay* in de Atacama-woestijn, wat "plaats van vertrek" betekent in hun taal. Het is een van de belangrijkste wetenschappelijke doelen van ALMA, gelegen op een hoogte van 5000 meter, om deze donkere en koude gebieden te onderzoeken om de processen te begrijpen die leiden tot ster- en planeetvorming.

De analyse en resultaten die gepresenteerd worden in dit proefschrift zijn mogelijk gemaakt door de capaciteiten van ALMA, die sinds het begin van de waarnemingen in 2013 hebben gezorgd voor een revolutie in het veld van planeetvorming. Door waarnemingen en theoretische voorspellingen van het universum op (sub-)millimetergolflengtes hebben we de unieke kans om terug te kijken naar onze oorsprong. Hoe is de aarde gevormd? Zien andere planetenstelsels er vergelijkbaar uit? Wat zijn de belangrijkste processen in deze eerste periodes?

Ster- en planeetvorming

Het proces van planeetvorming is intrinsiek verbonden met stervorming. Eerst vormen sterren uit het inkrimpende materiaal van een moleculaire wolk die samentrekt tot een prestellaire kern. Van kern naar planetenstelsel worden jonge sterren (YSO's) ingedeeld in Klassen (0, I, II of III). In de vroegste Klasse 0/I-fase zal een protoster actief materiaal accumuleren uit zijn omringend protostellair omhulsel, waarna, door behoud van hoekmoment, het binnenvallende materiaal zich zal verspreiden in de vorm van een draaiende, schijfachtige structuur rond de protos-

ter. Deze schijven worden protoplanetaire of planeetvormende schijven genoemd, omdat ze de geboorteplaatsen en het materiaalreservoir zijn van planetenstelsels.

De Klasse II protoplanetaire schijffase duurt 1-10 miljoen jaar en eindigt wanneer het meeste van het schijfmateriaal ofwel op de ster is gevallen, ofwel planeten heeft gevormd ofwel is verspreid, waarna een Klasse III planetenstelsel wordt onthuld. Dit proefschrift richt zich op de protoplanetaire schijffase, waar het planeetvormende materiaal met hoge resolutie kan worden waargenomen op (sub-)millimetergolflengten.

Protoplanetaire schijven

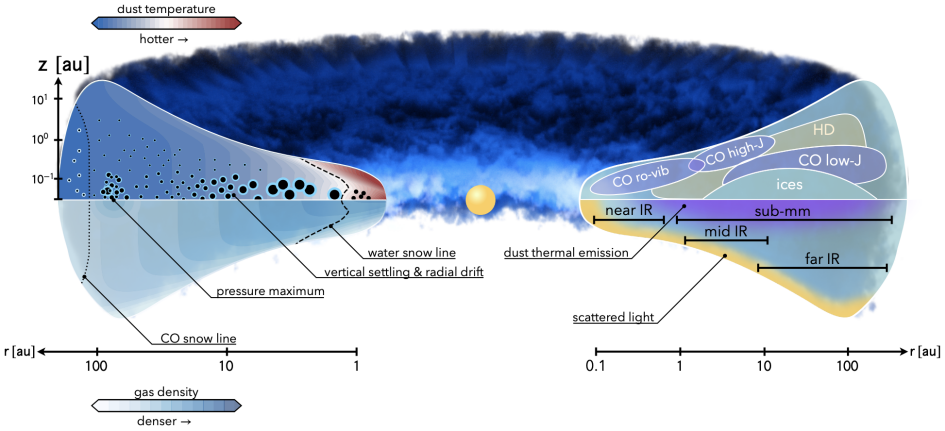
Net als de wolk waaruit ze geboren zijn, zijn protoplanetaire schijven gasrijke structuren met vaste deeltjes (stof) die slechts enkele procenten van hun massa uitmaken. Het grootste deel van het gasvormige schijfmateriaal is moleculair waterstof (H_2), maar de emissie hiervan is extreem zwak en ontoegankelijk met de huidige telescopen. Koolmonoxide (CO) is na H_2 het meest voorkomende molecuul en wordt vaak gedetecteerd, waardoor het veelvuldig gebruikt wordt om het gasreservoir te bestuderen. Andere moleculen in de gasfase die vaak zijn waargenomen in protoplanetaire schijven zijn: CN, HCN, H_2CO, CS, HCO^+, N_2H^+, H_2O en C_2H.

Figuur 6 toont de radiële en verticale materiaalverdeling binnen een schijf, samen met de belangrijkste kenmerken en processen. Radieel gezien wordt de schijf verdeeld tussen een heet binnendeel (<20,au) en koude buitengebieden. ALMA waarnemingen kunnen de buitenste delen van de schijf zien met een ruimtelijke resolutie van enkele astronomische eenheden. Het begrijpen van de morfologie, eigenschappen en dynamiek van eventuele radiële, azimutale of verticale substructuren is een belangrijk doel van planeetvormingsstudies om de heersende processen direct te onderzoeken.

De hoogte van de schijf wordt bepaald door hydrostatisch evenwicht. Dit betekent dat de balans tussen de zwaartekracht van de ster en de thermische ondersteuning van het materiaal hun verticale verdeling zal vormgeven. Daarom bevat de verticale verdeling van protoplanetaire schijven informatie over belangrijke fysische eigenschappen zoals de thermische- en dichtheidsstructuur. De verticale structuur kan ook gebruikt worden om de ionisatiestructuur en de aanwezigheid van hydrodynamische instabiliteiten en winden vast te stellen. Het waarnemen van de verticale dimensie in een groot aantal schijven is echter pas de afgelopen jaren mogelijk geworden en, in het bijzonder, door de resultaten van dit proefschrift.

Het bestuderen van de verticale schijfstructuur

Of de verticale dimensie van protoplanetaire schijven met ALMA te zien is, hangt af van de inclinatiehoek waaronder de schijf vanaf de aarde wordt bekeken. Er zijn twee extreme gevallen; 1) schijven met grote inclinaties ($\gtrsim 75°$) en 2) schijven met kleine inclinaties ($\lesssim 35°$). In deze beide gevallen kunnen slechts twee dimensies worden bekeken: voor schijven met grote inclinatie de verticale en radiële, voor schijven met kleine inclinatie de radiële en azimutale. De rest van

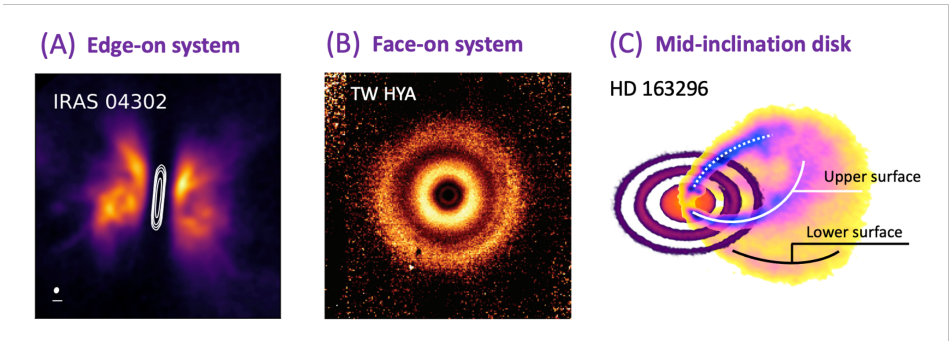


Figuur 1: Deze illustratie van Miotello et al. (2023) geeft de emissiegebieden, relevante schalen, stoftemperatuur en gasdichtheid in protoplanetaire schijven aan. De linkerkant toont de verdeling van stofdeeltjes als zwarte cirkels met verschillende grootes waarbij de grote cirkels grotere stofdeeltjes voorstellen. De rechterkant toont een vereenvoudigd beeld van de moleculaire gelaagdheid voor de belangrijkste moleculen in de gasfase. Onderin worden de gebieden waar warmtestraling en verstrooid licht vandaan komen aangegeven in paars en geel.

de protoplanetaire schijven met waargenomen inclinaties tussen ∼35-70° worden geclassificeerd als schijven met een gemiddelde inclinatie. Ons werk richt zich op deze bronnen, omdat ze een nauwkeurige weergave van de lopende processen in hun volledige driedimensionale structuur mogelijk maken, inclusief de verticale as. Figuur 4 toont elk van de inclinatiescenario's.

In schijven met gemiddelde inclinatie die door ALMA worden waargenomen, kan de verticale dimensie direct worden onderzocht via de emissiekaarten door de emissiemaxima te volgen, zoals weergegeven in het rechter paneel van Figuur 4. Deze methode is gevoelig voor eventuele substructuren of asymmetrieën die aanwezig kunnen zijn en is geïmplementeerd in algoritmes zoals ALFAHOR dat publiek beschikbaar is (zie Hoofdstuk 3 van dit proefschrift).

De directe toepassingen van het meten van de verticale moleculaire lagen in protoplanetaire schijven zijn talrijk, afhankelijk van de geselecteerde moleculen, de resolutie en de beschikbare informatie uit eventuele radiële of azimutale structuren. De temperatuurstructuur kan worden getraceerd door de piek van de helderheidstemperatuur van de CO-isotopologen, wat sterke beperkingen oplegt aan het ijken van thermochemische modellen en nauwkeurige temperatuurmetingen, die cruciaal zijn voor het bepalen van de turbulentie (zie Hoofdstuk 4 van dit proefschrift voor een toepassing). Als ruimtelijk opgeloste snelheidsinformatie beschikbaar is, kunnen recent ontwikkelde methoden de radiële, azimutale en verticale richtingen van de snelheid van het materiaal onderscheiden. In combinatie met metingen van de locatie van de verticale emissieoppervlakken kan de aanwezigheid van meridionale stromen of schijfwinden direct bepaald en getest worden, iets wat cruciaal is voor



Figuur 2: Drie protoplanetaire schijven met verschillende kijkhoeken. Voor IRAS 04302 (grote inclinatie) laten de kleuren de verdeling van de kleine stofkorrels, die goed gekoppeld zijn aan het gas, zien terwijl de witte contouren de mm-continuum straling van het stof tonen (van't Hoff et al. 2020). De TW Hya schijf (kleine inclinatie) wordt waargenomen in ALMA mm-continuüm (Andrews 2020). De HD 163296 schijf (gemiddelde inclinatie) toont stof ringen in ALMA mm-continuüm waarnemingen die het middenvlak van de schijf traceren terwijl een kaart van het CO gas op één specifieke snelheid de bovenste en onderste emissieoppervlakken laat zien die zich verticaal uitstrekken.

het begrijpen van schijfdynamica. Recent zijn de eerste onderzoeken uitgevoerd om de hoogte en eigenschappen van het hete bestraalde schijfoppervlak te bepalen met behulp van atomair koolstof.

Dit proefschrift

Aangezien het karakteriseren van de verticale structuur van protoplanetaire schijven belangrijk is om de omstandigheden en belangrijkste processen van planeetvorming beter te begrijpen, presenteert dit proefschrift een diepgaande analyse van zowel waarnemingen als de theoretische aspecten van de verticale dimensie. Hieronder volgt een overzicht van de hoofdstukken en conclusies van dit werk,

Hoofdstuk 2: **Vertically extended and asymmetric CN emission in the Elias 2-27 protoplanetary disk.** We analyseren CN $N = 3 - 2$ ALMA data in twee verschillende overgangen en vergelijken dit met de emissie van CO-isotopologen. Onze resultaten tonen aan dat de verticale locatie van CN en CO in Elias 2-27 gelaagd is en consistent is met de voorspellingen van thermochemische modellen. De gemeten CN-kolomdichtheid, lage optische diepte ($\tau \leq 1$) en de locatie nabij het schijfoppervlak komen overeen met thermochemische modellen voor schijven waar de vorming van CN wordt geïnitieerd door de reactie van N met UV-gepompt H_2. Deze studie benadrukt het belang van het traceren van de verticale locatie van verschillende moleculen om de fysische schijfomstandigheden te bepalen.

Hoofdstuk 3: **Directly tracing the vertical stratification of molecules in protoplanetary disks.** De ALFAHOR-code wordt gepresenteerd. Dit is een implementatie van de Pinte et al. (2018a) methode en leidt tot nauwkeurige verticale

profielen, zelfs voor moleculen met een lage signaal-ruisverhouding, met behulp van interactief maskeren van emissiekaarten. Met behulp van ALFAHOR bestuderen we de moleculaire emissieoppervlakken in Elias 2-27, WaOph 6 en de vijf bronnen van het MAPS ALMA Large Program. De temperatuurstructuur, karakteristieke hoogte door de gasdruk, substructuren en modulaties in de verticale profielen en relaties met de chemische oorsprong van elk waargenomen molecuul worden besproken. Over het geheel genomen tonen we aan dat het mogelijk is de verticale locaties van meerdere moleculaire soorten te traceren en deze informatie te relateren aan een breed scala van fysische en chemische eigenschappen van de schijf.

Hoofdstuk 4: **High turbulence in the IM Lup protoplanetary disk. Direct observational constraints from CN and C_2H emission.** Het bepalen van turbulentie in schijven is cruciaal voor het begrijpen van de evolutie van schijven, maar metingen van turbulentie vereisen kennis van de thermische omstandigheden die invloed hebben op de moleculaire emissie. Door de informatie over de ruimtelijk opgeloste temperatuurstructuur te combineren met de informatie die kan worden verkregen uit de analyse van de verticale structuur, presenteren we een nieuwe manier om direct turbulentie te meten. Deze methode is geijkt met behulp van CN en C_2H moleculaire emissie van de protoplanetaire schijf rond IM Lup. Onze analyse toont hoge turbulentie van Mach 0.4-0.6 aan bij $z/r \sim 0.25$. Deze studie presenteert het eerste empirische bewijs voor een verticale gradiënt in de schijfturbulentie, wat een belangrijke voorspelling is van magneto-rotatie instabiliteiten.

Hoofdstuk 5: **Vertical CO surfaces as a probe for protoplanetary disk mass and carbon depletion.** Met behulp van thermochemische modellen bestuderen we de eigenschappen van protoplanetaire schijven en hun jonge sterren die het meeste invloed hebben op de verticale locatie van CO $J = 2 - 1$ emissieoppervlakken. De voorspellingen van de modellen worden geijkt met behulp van de gegevens van CO-emissie van negentien schijven. We vinden dat het CO-emissieoppervlak het meest wordt beïnvloed door de totale schijfmassa (M_d) en de hoeveelheid vluchtig koolstof, wat leidt tot een z/r-M_d relatie. Om de schattingen van de totale schijfmassa op basis van de karakteristieke z/r in overeenstemming te brengen met de waarden die zijn verkregen op basis van analyse van het stofcontinuum, is een koolstofdepletie van 10-100 (ten opzichte van het ISM) nodig voor het grootste gedeelte van de bronnen.

Toekomstperspectief

Studies van verticale schijfstructuur in grote getalen bevinden zich in een vroeg stadium. Tot op heden zijn van slechts ~ 20 schijven verticale CO-oppervlakken gekarakteriseerd en slechts $\sim$8 schijven (Paneque-Carreño et al. 2023; Law et al. 2024) hebben gemeten verticale profielen van meer dan drie verschillende moleculen. Het algehele werk in dit proefschrift heeft aangetoond dat het mogelijk is om ALMA-waarnemingen te gebruiken om de verticale moleculaire gelaagdheid te

bestuderen en deze te relateren aan een aantal fysische processen.

Toekomstig werk moet zich richten op het uitbreiden van het aantal schijven waarin de moleculaire oppervlakken gekarakteriseerd zijn en het combineren van de chemische informatie met kennis over de verdeling van stofkorrels om schijfprocessen nauwkeurig te karakteriseren. Dit vereist waarnemingen op hoge ruimtelijke en spectrale resolutie van moleculen anders dan CO, wat doorgaans tijdrovend is vanwege de lage signaal-ruisverhouding van zeldzamere moleculen. De aankomende ALMA Wideband Sensitivity Upgrade in het volgende decennium zal ons in staat stellen deze studies in minder tijd en voor grotere groepen schijven uit te voeren.

Over het geheel genomen biedt de mogelijkheid om de materiaalverdeling van protoplanetaire schijven in alle drie de dimensies te bestuderen unieke inzichten in het proces van planeetvorming. Observationele studies halen nu de theoretische modellen in, die moeten worden herzien om de totaliteit van waargenomen kenmerken te verklaren. Op dezelfde manier als studies zich de afgelopen jaren hebben gericht op het verklaren van het bestaan van radiële en azimutale substructuren, moeten we nu naar de derde dimensie kijken en de informatie begrijpen die daaruit voortkomt. De technieken en resultaten van dit proefschrift hebben de basis gelegd voor veel toekomstige studies die zeker de vragen zullen beantwoorden die we nu open laten.