

Nederlandse samenvatting

DETECTIES van exoplaneten tonen aan dat er ten minste één planeet om elke ster draait. Planeten worden gevormd in de accretieschijf die de nieuw gevormde ster voedt. Het onderwerp van dit proefschrift is het begrijpen van de processen die plaats vinden in de vroegste stadia van ster- en planeetvorming. De vorming en evolutie van deze schijven, die uiteindelijk de bouwstenen worden van planeten en leven, zijn nog niet goed begrepen.

Het overgrote deel van de chemische elementen die nodig zijn voor leven (SPONCH) zoals wij het kennen worden geproduceerd in sterren. In de vroege stadia van het universum werden alleen de chemische elementen tot lithium gevormd. Tijdens de levensloop van een ster worden in zijn kern via kernfusie elementen tot ijzer (Fe) aangemaakt dat later, op het einde van de ster in het universum terecht komt. Na verloop van tijd worden meer van deze zwaardere elementen geproduceerd en opgenomen in de volgende generatie(s) van sterren en planeten. Gezien tijdens ster- en planeetvorming in toenemende mate complexe moleculen (> 6 atomen) aanwezig zijn vinden chemische processen plaats.

Ster en planeetvorming zijn nauw aan elkaar verbonden door de accretie schijf. Het concept van accretieschijven werden al voorgesteld door Kant en Laplace in de 18^{de} eeuw. Het duurde echter nog twee eeuwen voordat er via waarnemingen direct bewijs voor gevonden werd. De vorming en evolutie van accretieschijven hebben een fundamentele invloed op de hoeveelheid materiaal dat in de ster terecht komt en hoeveel er overblijft om planeten te vormen.

De formatie van sterren en planeten

Door het langzaam krimpen van een koude, geconcentreerde kern ($10\text{ K} = -263\text{deg C}$) bestaande uit gas en stof worden sterren gevormd. Recente waarnemingen met de *Herschel ruimtetelescoop* tonen aan dat deze kernen voorkomen in draadvormige structuren of filamenten (Fig. S.1). In deze structuren bestaat een verscheidenheid aan grootte en massa van kernen. De kleinere kernen in het filament zullen later sterren van lage massa, zoals onze zon, worden. Uit de materie van deze kernen wordt de ster en het planeten stelsel gevormd. Recent is grote vooruitgang geboekt in het begrijpen van de vorming van deze filamenten en de moleculaire wolken die zich daarin bevinden. Supersonische turbulentie in het ISM zorgt voor de samendrukking van gas in platte structuren en filamenten. Terwijl de kern materie van de moleculaire wolk opneemt, zal deze beginnen te krimpen onder zijn eigen zwaartekracht. Dit proces wordt beheerst door een aantal bijkomende processen zoals thermische druk, magnetische velden en turbulentie.

Een ster is een hete licht gevende bol van gas die aangedreven wordt door de energie die vrijkomt bij de nucleaire reacties in zijn kern. De verschillende stadia van de vorming van sterren met lage massa ($M \leq 2M_{\odot}$, de massa van de zon is $M_{\odot}$) worden redelijk goed begrepen in vergelijking met sterren met een hogere massa, maar verschillende details blijven onduidelijk. Hoewel massievere sterren helderder en makkelijk te observeren zijn, zijn sterren met lagere massa talrijker. Het bestuderen van de fysische processen die plaatsvinden gedurende stervorming geeft inzicht in de vorming van ons eigen zonnestelsel en in het ontstaan van leven op aarde.

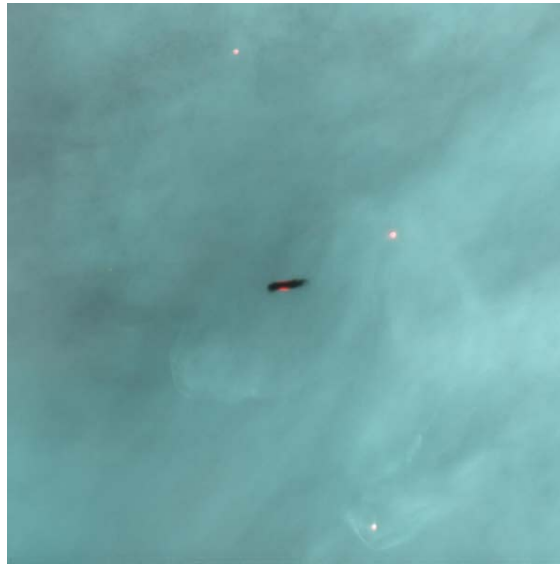
Bij de krimp als gevolg van behoud van energie en impuls worddt een accretieschijf gevormd. De eerste theoretische studies van accretieschijven komen uit de jaren 70 door Shakura



Figuur S.1 — Samengestelde kleurenafbeelding van vijf verschillende golflengtes, genomen met de Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS) en de Spectral and Photometric Imaging Receiver (SPIRE) van de Herschel ruimtetelescoop. De meeste golflengtes vallen buiten het optisch bereik, maar zijn zichtbaar in het infrarood door straling van het gas en stof dat zich rond de nieuwe ster bevindt. Deze materie is niet uniform verdeeld: de meest heldere straling komt uit de actieve stervormingsgebieden die verbonden zijn met de filamenten. Blauw betekent straling van het warme stof, terwijl rood straling van koud stof betekend. Credits: ESA en de SPIRE & PACS consortium.

en Sunyaev. Opdat moment was er reeds indirect bewijs van accretieschijven gevonden door polarimetrische studie van visuele moleculaire transitie lijnen. Het duurde tot 1989 dat Strom en medewerkers de eerste statistische studies van accretieschijven uitvoerden, met behulp van de *Infrared Astronomical Satellite (IRAS)*. Zij verrichtten waarnemingen van accretieschijven door middel van de straling van het warme stof in de schijf. Hierna werd het belangrijkste bewijs voor het bestaan van accretieschijven geleverd door de directe waarnemingen van accretieschijven met *Hubble* in 1994 door O'Dell en medewerkers (Fig. S.2). Tegenwoordig weet men dat er zich rond elke jonge ster een accretieschijf bevindt en deze een cruciale rol speelt bij de planeet- en stervorming.

Planeetvorming zal uiteindelijk plaats vinden in de accretieschijf. Op het moment van schrijven zijn er meer dan 1000 exoplaneten bekend en meer dan 3000 kandidaten. Het meest aanvaarde scenario van planeetvorming is via het samenklonteren van kleine stofdeeltjes die



Figuur S.2 — Een afbeelding in het visuele bereik van de zijkant van een protoplanetaire schijf, genomen met Hubble. Het stof in de schijf blokkeert de straling van het gas en stof in de achtergrond. Dit is een vergelijkbare afbeelding zoals genomen in 1993 door O'Dell, die het cruciale bewijs vormde voor accretieschijven rond jonge sterren. Credits: J. Bally (Universiteit van Colorado) en H. Throop (SWRI).

op deze manier grotere lichamen vormen. Echter, van grotere deeltjes (radius > 1 cm) is het bekend dat deze zich gemiddeld sneller voort bewegen dan kleinere deeltjes met de hoogste snelheden bij deeltjes van ongeveer 1 m groot. Bij een botsing tussen twee grote projectielen aan hoge snelheid kunnen deze in stukken breken waarbij delen in de ster terecht kunnen komen. Dit mechanisme beperkt de grootte van de brokstukken tot 1 m en staat dus de vorming van planeten in de weg. Het wordt de meter-grootte barrière genoemd. Een oplossing voor die probleem werd voorgesteld door Eddington in 1937 en bestaat erin dat via ijs grotere brokstukken gevormd kunnen worden. Deze stelling werd bevestigd via waarnemingen door Gillet en Forrest in 1973. Dankzij vele waarnemingen van ijs rond kleine stofdeeltjes, is het gedurende de afgelopen jaren duidelijk geworden dat water het hoofdbestanddeel van dit ijs vormt. Dit ijs zorgt ervoor dat stofdeeltjes gemakkelijker aan elkaar plakken bij een botsing en het op deze manier toelaten om grote brokken in de accretieschijf te vormen. Tijdens de vroege stadia bevinden zich naast stof ook grote hoeveelheden gas in de accretieschijf. Dit is noodzakelijk voor de vorming van gasreuzen zoals Jupiter.

Dit proefschrift bestudeert de kritische fysische processen die tijdens de vroegste stadia van stervorming, $\sim 10^4$ – 10^5 jaar na de samentrekking onder zwaartekracht van een pre-stellare kern. Het is algemeen aanvaard dat planeten in accretieschijven vormen en dat accretieschijven een belangrijk onderdeel zijn in de vorming en levensloop van sterren. De vorming van een accretieschijf en vroege stadia in hun levensloop worden tot op heden nog helemaal niet begrepen. De voornamelijkste vragen van dit proefschrift zijn als volgt:

- Bestaan er accretieschijven, zoals deze gevonden kunnen worden rond pre-hoofdreks sterren, rond nieuw geboren sterren?
- Kunnen accretieschijven waargenomen worden en hoe kunnen ze onderscheiden worden van hun geboortekomgeving?
- Is de fysische en chemische structuur consistent met de huidige modellen van accretieschijfvorming?
- Hoe stabiel zijn ingezeten accretieschijven en kunnen ze hun hoge samentrekkingsnel-

heid volgen van uit de envelop? **I have no clue what this means. Steven**

- Hoeveel dragen accretieschijven bij aan de waargenomen moleculaire lijnen?

Stralingsprocessen: continuüm en spectraallijnen

De eigenschappen van jonge sterren worden typisch afgeleid door middel van de breedbandige IR straling van het stof. Door de UV straling van de jonge ster wordt het stof opgewarmd, vervolgens zal het stof deze warmte uitstralen aan langere golflengte in het IR. Het evenwicht tussen beiden bepaalt de temperatuur van het stof. Dus, hoe meer de ster straalt, hoe warmer het stof. Tegelijkertijd neemt de ster materiaal op uit zijn omgeving. Door deze absorptie houdt het stof het licht tegen. In de vroege stadia van stervorming bevindt zich in de accretieschijf veel koude materie die zich in een koude omgeving bevindt. Hierdoor is het moeilijk om de groeiende ster en accretieschijf te bestuderen. Theoretische modellen worden daarom gebruikt om de waargenomen straling te begrijpen.

Hoewel de warmtestraling van het stof de energie van het groeiende stelsel traceert worden atomaire en moleculaire emissies gebruikt om de structuur van de buitenste gaslagen van jonge sterren te bepalen. Het universum is vol met verschillende moleculen in verschillende fysische stadia. Door middel van waarnemingen van verschillende moleculaire overgangen kunnen de verschillende fysische condities, zoals temperatuur, dichtheid en snelheidsstructuren onderzocht worden. Het belangrijkste is dat deze overgangen zich op vaste frequenties bevinden. Koolstofmonoxide (CO) wordt hierin het meest gebruikt. Elke beweging van het gas veroorzaakt een Doppler verschuiving van de waargenomen frequentie. Wanneer de lijnen niet opgelost kunnen worden kan op deze manier de beweging van het gas bepaald worden.

Observationeel gereedschap

Om de accretieschijf in zijn omgeving te bestuderen zijn interferometrische waarnemingen op millimeter golflengte nodig. Op deze manier wordt warmtestraling van de warmtestraling van de accretieschijf onderscheiden van de omgeving. Interferometrie is een techniek waarbij signalen van meerdere telescopen gecombineerd worden om op deze manier genoeg ruimtelijke resolutie te verkrijgen en zo de schijf op te kunnen lossen. Bijvoorbeeld, een 12 meter telescoop kan CO straling oplossen uit een gebied ter grote van 7000 AE (7000 keer de afstand van de aarde tot de zon). Twee van deze telescopen op een afstand van 1 km van elkaar hebben een oplossend vermogen van 80 AE in hetzelfde gebied. Interferometrische waarnemingen van stof en gas in het submillimeter en millimeter gebied zijn cruciaal geweest in het aantonen van de processen binnenin stervormingsgebieden. De afstand tussen de interferometrische telescopen is variabel om zo, afhankelijk van de nood, verschillende resoluties (0.5''–20'') te verkrijgen. Een paar telescopen op korte afstand wordt vooral gebruikt voor het waarnemen van grootschalige structuren, zoals de omgeving, terwijl een paar met grote afstand, en dus een hogere resolutie, gebruikt wordt om in te zoomen op de accretieschijf. Door meer dan twee telescopen met verschillende afstanden te combineren in verschillende configuraties kunnen alle schalen tegelijkertijd waargenomen worden. Een afbeelding wordt verkregen door de Fourier transformatie van een verzameling van deze gecorreleerde gegevens. Een stationaire groep telescopen maakt gebruik van de aardrotatie om gecorreleerde waarnemingen te verrichten. Vele gecorreleerde waarnemingen zijn nodig om een volledige afbeelding te verkrijgen. Een typische waarneming in dit proefschrift heeft meer dan 5.000 gecorreleerde waarnemingen. De nieuwste telescoop is de Atacama Large Millimeter Array (ALMA, 66 telescopen) in Chili. Met een dergelijke grote hoeveelheid telescopen zal het makkelijker zijn om de zwakke structuren in een stervormingsgebied waar te nemen.

Dit proefschrift en vooruitzicht

Dit proefschrift behandelt zowel de theoretische en observationele aspecten van accretieschijfvorming gedurende de vroege stadia van stervorming. Semi-analytische en numerieke hydrodynamische modellen zijn samengevoegd met breedbandige stralingsoverdracht via het stof. De voorspelde moleculaire lijn emissies zijn vergeleken met de waarnemingen. Deze simulaties en voorspellingen worden gecombineerd met ruimtelijk en spectraal opgeloste observaties van optisch dunne CO emissies naar minder ingezette (verder geëvolueerde) jonge stellaire objecten. De waarnemingen zijn uitgevoerd met de Plateau de Bure Interferometer (PdBI) in Frankrijk. De volgende lijst geeft een overzicht van de resultaten van dit proefschrift.

- De breedbandige straling en de moleculaire lijnen worden gesimuleerd door drie dimensionale hydrodynamische simulaties inclusief magnetische velden in **Hoofdstuk 2**. Het is een bekend probleem in de astrofysica dat de aanwezigheid van magnetische velden de vorming van accretieschijven kan voorkomen. Twee van deze simulaties worden gebruikt om de overeenkomsten en verschillen te onderzoeken tussen een simulatie waarin de schijf wel vormt, en één waarin dit niet gebeurt. De voorspellingen van 3D simulaties worden vergeleken met 2D semi-analytische modellen van ster- en accretieschijfvorming. De vergelijking toont aan dat interferometrische waarnemingen, zoals geleverd door ALMA, nodig zijn om de vormingsprocessen van accretieschijven te onderzoeken. Het zal daardoor mogelijk zijn om deze theoretische modellen in de nabije toekomst te testen.
- Tijdens de vroegste stadia van stervorming kan de accretieschijf koud en dik zijn. Dit leidt tot gravitationele samentrekking hierin, en zorgt op deze wijze voor instabiliteiten. Hierbij komt dat deze instabiliteiten plaats vinden terwijl het omliggende materiaal verder op schijf valt. Dit soort instabiliteiten zijn voorgesteld als een mechanisme voor planeetformatie omdat ze een deel van de accretieschijf fragmenteren. **Hoofdstuk 3** onderzoekt door middel van 3D simulaties of de schijf kan fragmenteren als er een grote hoeveelheid materiaal ophoopt. Het resultaat suggereert dat de schijf niet breekt, maar gewelddadige verschuivingen ondergaat waardoor een grote hoeveelheid materie in n keer op in de ster terecht komt.
- **Hoofdstuk 4** presenteert de voorspelde evolutie van moleculaire lijnen en hun eigenschappen door middel van 2D modellen. De moleculaire emissielijnen van koolstofmonoxide worden gesimuleerd met behulp van waarnemingen van de *Herschel ruimtetelescoop*. De voorspellingen in het langere golflengte bereik worden vergeleken met die in het infrarood. Veranderingen in de vibrationele en rotationele energie zorgt voor infrarood straling, terwijl veranderingen in rotatie de oorzaak van straling op langere golflengte zijn. De verandering van energie is groter in het infrarode spectrum en meet zo het warme gas.
- Hoofdstukken 2 en 4 suggereren dat de diep ingezette accretie schijf makkelijk blootgelegd kan worden door ruimtelijke en spectrale waarnemingen van moleculaire lijnen. Deze emissie zou uitgestraald moeten worden door de schijf als een substantieel gedeelte van de omgeving is weggefallen, zoals verwacht voor verder geëvolueerde systemen. **Hoofdstuk 5** presenteert interferometrische waarnemingen van ^{13}CO en C^{18}O 21 lijnen voor vier bekende jonge protosterren. Drie van deze vier objecten tonen de aanwezigheid van roterende schijven aan. De grootte van de schijven is consistent met de 2D modellen van schijf-formatie.
- De aanwezigheid van deze schijven kan dienen als aanvullende verwarming. De schijf laat energie vrijkomen wanneer het materie naar binnen richting de ster transporteert,

omdat het zijn impulsmoment en energie moet behouden. Dit energetische proces verwarmt de schijf vanuit het centrum zodat ijs alleen ver weg van de centrale ster aanwezig kan zijn. **Hoofdstuk 6** presenteert een theoretische studie van de belangrijkste ijs soorten (H_2O , CO , CO_2) van actieve schijven rond ingezeten protosterren. Deze hete schijf wordt gedacht nodig te zijn voor formatie van het zonnestelsel. Dit hoofdstuk presenteert het verband tussen de vroege stadia van ster formatie tot de formatie van planetaire systemen. De voorspellingen worden vervolgens vergeleken met de waargenomen emissie van water rond protosterren.

Toekomstperspectieven Huidige Waarnemingen hebben de aanwezigheid van roterende schijven aangetoond in de binnenste paar 100 AU rond een aantal ingezeten protosterren. Dit proefschrift vergelijkt ook de omvang van de waargenomen ingezeten rationeel ondersteunde schijven met de schijfvormingsmodellen. Om de details van schijfvorming en evolutie in de vroege stadia van stervorming echter verder te kunnen bestuderen is de ruimtelijke en spectrale gevoeligheid die ALMA zal leveren nodig. Waarnemingen met hogere ruimtelijke en spectrale resolutie van moleculaire lijnen kunnen de Kepleriaanse schijf van de ineenstortende omgeving onderscheiden. De temperatuursverdeling over de schijf, die cruciaal is voor het onderzoek naar het verwarmings proces, vereist twee verschillende overgangen van een molecule om hun aangeslagen toestand te kunnen onderzoeken. Verder is een hoog-gevoelige waarneming nodig om de snelheidsstructuren van de schijf te kunnen onderzoeken aangezien de moleculaire emissies bij hoge snelheden veel zwakker zijn vergeleken met het centrum. Dit kan in de toekomst veel gemakkelijker worden gedaan om zo de kinematiek op de kleine schaal bloot te leggen. De chemische structuur van de jonge schijf is ook een essentieel onderdeel voor ons begrip van de vorming van planetaire stelsels.