



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Observational constraints on the evolution of dust in protoplanetary disks

Martins e Oliveira, I.

Citation

Martins e Oliveira, I. (2011, June 7). *Observational constraints on the evolution of dust in protoplanetary disks*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/17687>

Version: Corrected 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/1887/17687>

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

Nederlandse Samenvatting

Inleiding

Metingen van de kosmische achtergrondstraling gedaan met de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) hebben aangetoond dat het heelal ongeveer 14 miljard jaar geleden is ontstaan. De moderne kosmologie heeft verder laten zien dat het heelal grotendeels ‘donker’ was gedurende de eerste miljard jaar van zijn bestaan. In deze fase bestond materie in het heelal voornamelijk uit elektronen en geïoniseerd waterstof. De eerste sterren vormden waarschijnlijk pas na de eerste paar honderd miljoen jaar. Naarmate het heelal afkoelde en enorme massa's neutraal waterstofgas samenklonterden, kwam de kosmische sterrenfabriek echter goed op gang en werden de eerste sterrenstelsels gevormd. Vandaag de dag bevat het waarneembare heelal zo'n 10^{21} (1 *triljard*) sterren! De ontwikkeling van sterren bepaalt grotendeels hoe sterrenstelsels eruit zien. Tevens bepaalt het hoe de meeste elementen zwaarder dan waterstof gevormd werden ten gevolge van de chemische evolutie die diep binnenin de sterren plaatsvindt. Oorspronkelijk bestonden deze elementen slechts uit waterstof, helium en kleine hoeveelheden lithium, beryllium en boor. Zwaardere elementen zoals zuurstof, koolstof en stikstof bestonden nog niet.

Sterren worden geboren, ontwikkelen zich (ze evolueren) en sterven. Ze ontstaan grofweg wanneer een wolk van moleculair gas inelkaarstort. De nieuwe sterren ontwikkelen zich daarna op verschillende manieren afhankelijk van hun beginmassa's. Tijdens deze evolutie vindt kernfusie plaats die lichtere elementen omzet in zwaardere elementen. Op deze wijze produceren sterren de energie die nodig is om te voorkomen dat de ster ten gevolge van zijn eigen zwaartekracht ineenstort. De sterren veranderen verder vaak van massa (door in- of uitstroom van materie), van afmeting (groter of kleiner) en helderheid (bijvoorbeeld door een verandering in de thermo-nucleaire reacties in de kern van de ster, of door stof). Sterren kunnen vormen in isolatie, maar veel vaker worden ze gevormd als onderdeel van kleine of grote groepen. Wanneer een ster al zijn nucleaire brandstof verbruikt heeft kan de stralingsdruk van binnenuit in de ster de druk van de zwaartekracht niet meer compenseren. Een onontkoombare kettingreactie is het gevolg die uiteindelijk zal leiden tot de dood van de ster. Sterren van gemiddelde massa (zoals de zon) stoten hun buitenste laag van gas af en veranderen in een zogenaamde “planetaire nevel”. Zwaardere sterren eindigen in krachtige explosies: supernova's. Tijdens deze explosies worden nieuw geproduceerde elementen, die uiteindelijk nodig zijn voor de stofdeeltjes waar planeten uit bestaan (zoals silicium, zuurstof, koolstof, magnesium en ijzer), terug in de ruimte geblazen. Daar

worden deze deeltjes opgenomen in het “interstellair medium” (ISM), de ijle ruimte tussen de sterren. Dit verrijkte ISM levert vervolgens het materiaal aan voor de productie van een volgende generatie van sterren, hun bijbehorende planetenstelsels, en in het geval van de aarde zelfs levende organismen.

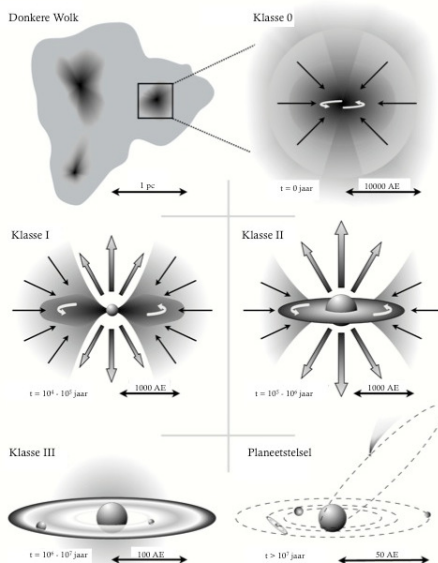
Een populaire theorie claimt dat de explosie van een supernova in ons eigen Melkwegstelsel ten grondslag ligt aan het ontstaan van een jonge Zon omgeven door een proto-planetaire schijf, zo’n viereneenhalf miljard jaar geleden. Het materiaal in deze zogenoemde “oernevel” vormde uiteindelijk de Zon, acht planeten (Mercurius, Venus, Aarde, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus) en talrijke kleinere hemellichamen (denk aan dwergplaneten zoals Pluto, kometen en asteroïden). De structuur en samenstelling van deze hemellichamen bevatten informatie over hoe zij precies zijn ontstaan, maar vele details over dit ontstaansproces zijn nog onbekend.

Dit proefschrift beschrijft de ontwikkeling van jonge sterren en hun proto-planetaire schijven en de evolutie van de stofdeeltjes waaruit die schijven bestaan. Deze studie beslaat dus de eerste fase van de ontwikkeling van planeten zoals die in ons eigen zonnestelsel.

Het Ontstaan van Sterren met Lage Massa

Het meest voorkomende type sterren zijn sterren met een relatief lage massa (een massa vergelijkbaar met ongeveer de helft van die van onze zon, of $\sim 0.5 M_{\odot}$). Deze sterren domineren de gehele sterpopulatie in sterrenstelsels, zowel in hun aantal als in hun totale massa. De sterren vormen uit vrij dichte concentraties van interstellair gas en stof, “moleculaire wolken” genaamd. De totale hoeveelheid stof in deze wolken beslaat ongeveer 1% van hun totale massa. Dit stof bestaat voornamelijk uit amorfe silicaten en koolstofdeeltjes met een doorsnede van kleiner dan een micrometer ($< 1 \mu\text{m}$). De stofwolken zijn grotendeels ondoorzichtig in het visuele golflengtegebied vanwege hun hoge extinctie (absorptie van licht door stofdeeltjes). Op langere golflengten zoals het infrarood zijn ze echter transparant.

Stervorming vindt plaats wanneer een deel van een wolk voldoende afkoelt en een voldoende hoge gasdichtheid bereikt ten gevolge van de samentrekking door zijn eigen zwaartekracht. Gedurende dit proces wordt zwaartekrachtenergie omgezet in bewegingsenergie wat er toe leidt dat gasdeeltjes met hoge snelheden tegen elkaar botsen. Zo neemt de temperatuur van de ster-in-wording en zijn omgeving toe. Deze thermische druk helpt ook om de naar binnen gerichte druk van de zwaartekracht te compenseren zodat de wolk niet verder ineenstort. Als de temperatuur in het centrum zo hoog is dat er kernfusie plaatsvindt is een nieuwe ster, omgeven door een roterende schijf van gas en stof, geboren. Op den duur lossen de restanten van de oernevel rondom de ster op. De jonge ster en zijn stofschijf zijn nu zichtbaar. Deze fase staat bekend als de “T-Tauri” fase. Vanaf deze fase is de evolutie van de stofschijf gekoppeld aan die van de ster.



Figuur 1 – Het ontstaan van een ster met lage massa. Linksboven: Kernen met een relatief hoge gasdichtheid vormen in een moleculaire wolk. Rechtsboven: Een kern stort ineen onder de invloed van zijn eigen zwaartekracht. Links-midden: De restanten het omhulsel rondom de proto lossen op, en bipolaire straal-stromen (“jets”) zorgen voor een afname van het impulsmoment van het systeem. Rechts-midden: De nieuwe ster en zijn circumstellaire schijf worden zichtbaar. Links-onder: Als het resterende gas verstrooid wordt hebben de reuze-planetten zich al gevormd. Rechts-onder: De schijf is volledig opgelost. Het nieuwe zonnestelsel is nu zichtbaar.

Eigenschappen van Sterren

Voordat men de structuur en de evolutie van protoplanetaire schijven en hoe deze in verband staan met de centrale ster kan onderzoeken, moet men ook de eigenschappen van de centrale ster kunnen bepalen. Sterren stralen als een zogenaamd “zwart lichaam” met een karakteristieke temperatuur die afhangt van de massa van de ster. De zwarte-lichaamstraling van zware sterren is het sterkst op ultraviolette en optische golflengten. De straling van sterren met een lagere massa is sterker op langere golflengten (optisch en nabij-infrarood). Het optimale golflengtegebied om de T-Tauri sterren, die een relatief lage massa hebben, te bestuderen is dus het optisch/nabij-infrarood.

Aan de hand van optische spectra van een verzameling van representatieve sterren waarvan de temperatuur nauwkeurig bepaald is kan men een aantal karakteristieke spectrale eigenschappen definiëren die vervolgens gebruikt kunnen worden om de temperaturen van andere, willekeurige sterren gemakkelijk te bepalen. Behalve de temperatuur, geven optische spectraalwaarnemingen ook informatie over de zwaarte-

kracht aan het oppervlak van de ster, de rotatiesnelheid, en het metaalgehalte. Deze eigenschappen zijn het beste te bestuderen met behulp van spectroscopische waarnemingen met gemiddelde tot hoge resolutie (het vermogen om kleine details in spectra van elkaar te onderscheiden). Als de afstand tot de ster bekend is, kan de helderheid van de ster rechtstreeks afgeleid worden door middel van fluxmetingen in verschillende golflengte-banden. De massa, straal en leeftijd kunnen bepaald worden aan de hand van een vergelijking met stermodellen. De afleiding van dit soort cruciale eigenschappen van sterren is het onderwerp van twee hoofdstukken in dit proefschrift.

Protoplanetaire Schijven en het Ontstaan van Planeten

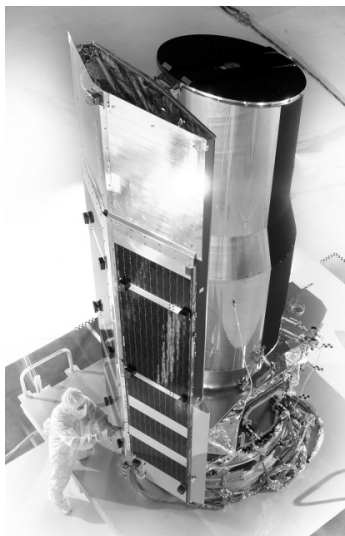
De herkomst van planeten is nauw verbonden met de evolutie van de protoplanetaire schijven waaruit zij worden gevormd. Echter, de details over hoe deze schijven zich precies ontwikkelen vanuit een samenstelling van kleine stofdeeltjes en gas in de beginfase, tot complexe planeetstelsels in de eindfase, zijn nog onbekend. We zien schijven rond bijna alle jonge sterren, terwijl de meeste oudere hoofdreekssterren geen schijven meer hebben. Dit bewijst dat de schijven evolueren, ofwel door de verwijdering van hun stof en gas, ofwel door het omzetten van stof en gas in grotere lichamen (planeten, asteroiden, kometen).

Eigenschappen van de Schijven

Het materiaal waar de protoplanetaire schijf uit bestaat, staat bloot aan de straling van de centrale ster. Het stof in de schijf absorbeert een gedeelte van deze straling, en zet deze om in straling op langere golflengten. Het belangrijkste bewijs voor het bestaan van protoplanetaire schijven rond vele jonge sterren wordt - weliswaar indirect - geleverd door de waarneming van overmatige straling op infrarode en submillimeter golflengten welke niet van de ster zelf afkomstig is. Directe plaatjes van deze stofschijven kunnen met de huidige sterrenkundige observatoria alleen van de paar meest nabije schijven gemaakt worden. Het bestaan van stofschijven rond de meeste andere sterren wordt dus vaak indirect afgeleid door te zoeken naar de karakteristieke overmatige straling in het infrarood.

De aardatmosfeer absorbeert een groot deel van het licht op infrarode golflengte. Ruimtetelescopen met een grote gevoeligheid voor infrarood licht bieden uitkomst. Veel van de meetgegevens in dit proefschrift zijn dan ook gedaan met de *Spitzer Ruimteteleskoop*. Deze telescoop is in 2003 gelanceerd en werkte met volle capaciteit tot de zomer van 2009. Hierna was de voorraad helium waarmee de telescoop gekoeld werd uitgeput en eindigde het “cryogene” (gekoelde) gedeelte van de ruimtemissie. Tijdens dit schrijven produceert Spitzer nog steeds meetgegevens in beperkte capaciteit in de zogenaamde “warme missie”. Spitzer heeft drie instrumenten aan boord. IRAC maakt opnamen op golflengten van 3.6, 4.5, 5.8 en 8 micrometer en MIPS op 24, 70 and 160 micrometer. IRS, tenslotte, doet spectraalwaarnemingen op 5–40 micrometer. Deze drie instrumenten zijn belangrijk voor het onderzoek naar protoplanetaire schijven, omdat deze verschillende golflengtegebieden bij uitstek gebruikt

kunnen worden om de verschillende onderdelen van protoplanetaire stofschijven te onderzoeken.



Figuur 2 – De Spitzer Ruimtetelescoop (Credit: NASA).

De emissie op korte infrarode golflengten is over het algemeen afkomstig van het warme oppervlak en de binnenrand van de stofschiif. De emissie dieper in de schijf is afkomstig van kouder stof en is de dominante stralingsbron op de langere, verinfrarood en millimeter golflengten. Als één of meerdere van deze componenten boven- of ondergemiddeld in een stofschiif aanwezig zijn heeft dat duidelijke gevolgen voor het waargenomen spectrum. Hoe groter de overmaat aan infrarode straling, bijvoorbeeld, hoe wijder de schijf ten opzichte van het middenvlak uitloopt. Een schijf met relatief weinig gas en stof zal ook weinig overmaat aan infrarood licht laten zien. Ook leidt de aanwezigheid van openingen in de schijf tot specifieke kenmerken in het spectrum. Omdat deze openingen vertaald kunnen worden naar een gebrek aan kleine stofdeeltjes, zullen zij minder emissie op korte infrarode golflengten tot gevolg hebben. Behalve continuüm straling, bevat het spectrum van een stofschiif ook een aantal specifieke kenmerken zoals veroorzaakt worden door de zogenaamde polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAHs) of van silicaten (op 10 en 20 μm , dus in het golflengtebereik van de Spitzer/IRS). Deze kenmerken kunnen gebruikt worden om bepaalde fysische en chemische processen die van invloed zijn op het stof te bestuderen. Dit is het onderwerp van twee hoofdstukken in dit proefschrift.

Processen die van Invloed zijn op de Schijf

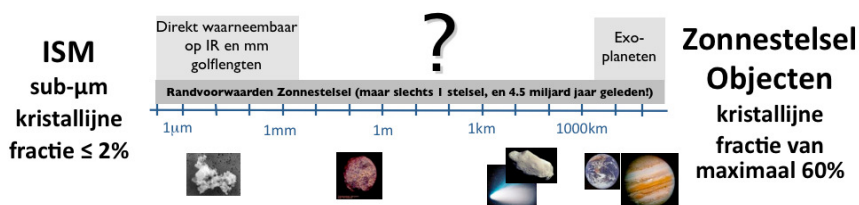
De evolutie van een schijf wordt bepaald door de combinatie van interne en externe processen. De centrale ster, de belangrijkste energiebron van het systeem, heeft directe invloed op de verspreiding van stof en gas in de schijf. Sterwinden kunnen massa van de schijf wegblazen. Energetische, ultraviolette en röntgen fotonen afkomstig van de centrale of een andere nabijgelegen ster, kunnen het schijfoppervlak verhitten en zo massa-verlies bewerkstelligen door de thermische druk. Dit proces, foto-evaporatie genaamd, is samen met de evolutie van de viscositeit van de schijven een efficiënt mechanisme om het materiaal waaruit de schijf bestaat verder te verspreiden. Terwijl materiaal de schijf verlaat, kan een gedeelte worden opgeslokt door de centrale ster. Het centrale gedeelte van de schijf staat namelijk sterk onder de invloed van het magneetveld van de ster, wat ervoor zorgt dat materie langs de magnetische veldlijnen vanaf de schijf naar de ster verplaatst wordt. Dit accretieproces produceert hoge temperatuur optische en UV continuüm straling en heldere emissielijnen waarvan de $H\alpha$ waterstoflijn de helderste is.

Behalve deze externe processen wijzen theorie, waarnemingen en laboratoriumexperimenten ook op het bestaan van processen die van invloed zijn op het stof en de structuur binnen in de schijf. Door de hoge materiedichtheid van de schijf botsen de deeltjes en klontert het stof. Naarmate de stofdeeltjes groeien, bewegen ze onder de invloed van de zwaartekracht naar het middenvlak van de schijf. Dit schept dan een omgeving met een nog hogere dichtheid, waar deeltjes makkelijker kunnen uitgroeien tot lichamen van ruwweg 1 kilometer in doorsnee: de planetesimalen. Deze processen beschrijven dus het eerste stadium van het ontstaan van planeten. Observatueel gezien komt de klontering van deeltjes in essentie overeen met het verdwijnen van de stof component. Dit wordt gekenmerkt door een afplatting van de stofschijf en een vermindering van de overmaat aan infrarood licht die zo typerend is voor de jonge stofschijven.

“Puin-schijven” bestaan uit grote planetesimale stenen en kleinere lichamen die gegroeid zijn door de vele botsingen tussen planetesimalen. Deze puin-schijven worden zowel rond geëvolueerde als rond jonge sterren gevonden. Het is aannemelijk dat deze fase volgt op die van de protoplanetaire schijf, wanneer al het gas verdwenen is.

Het Ontstaan van Planeten

Het is nog grotendeels onbekend hoe het ontwikkelingsproces van planetesimalen tot planeten verloopt. Het onderzoek naar dit vraagstuk wordt met name bemoeilijkt door het feit dat objecten met afmetingen van 10 cm tot 100 km niet direct waargenomen kunnen worden. Er zijn twee modellen die de vorming van planeten (objecten met afmetingen van duizenden kilometers) mogelijk kunnen verklaren. In het “kern-aanwas model” neemt men aan dat objecten met een grootte van een kilometer verder groeien door middel van klontering, net zoals dat voor kleine stofdeeltjes plaatsvindt. De zwaartekrachts-interactie tussen de planetesimalen leidt tot samensmeltingen en de vorming van een kern van zware elementen. Als de kern massief genoeg is trekt



Figuur 3 – Het planeetvormingsproces, zoals dat ook in ons Zonnestelsel heeft plaatsgevonden, impliceert een enorme groei van zeer kleine, amorse stofdeeltjes met diameters van kleiner dan een micrometer (links) tot zeer grote, planeetachtige objecten met diameters van duizenden kilometers (rechts). Hoe dit zeer complexe proces precies verloopt is onbekend.

zijn zwaartekrachtsveld grote hoeveelheden gasdeeltjes aan en zo ontstaat een gasreus. In het tweede model, het zogenaamde “schijf-instabiliteits model” daarentegen, wordt aangenomen dat de protoplanetaire schijf fragmenteert wat leidt tot een populatie van grote klonten die vervolgens ineenkrimpen en planeten vormen, analoog aan het proces van ster-vorming in moleculaire wolken. Het kern-accretie model wordt momenteel door de meeste theoretici ondersteund, maar de theorieën achter beide modellen hebben zowel goede eigenschappen als tekortkomingen. Een probleem met het kern-accretie model is dat de tijdsduur waarin de eerste kern gevormd wordt mogelijk langer is dan die waarin het gas uit de schijf verdwenen is. Een probleem met het schijf-instabiliteitsmodel is dat het mogelijk alleen werkt voor schijven die veel zwaarder zijn dan de huidige waarnemingen aangeven.

Het Zonnestelsel en Exoplaneten

Steeds vaker worden er planeten rond andere sterren gevonden. Van honderden sterren is nu bekend dat zij worden omgeven door één of meerdere planeten. Planetenstelsels beperken zich dus niet tot ons zonnestelsel alleen. De eigenschappen van al deze waargenomen planetenstelsels zijn vaak verschillend. Het is nog onbekend waar deze diversiteit vandaan komt, maar het heeft waarschijnlijk iets te maken met hun ontstaansproces. Planeten en planetenstelsels lijken een natuurlijk gevolg te zijn van de evolutie van de stofschijven. Echter, niet rond alle typen sterren leidt de stofschijf tot de vorming van planeten: de meeste hoofdreekssterren bijvoorbeeld lijken volgens de huidige waarnemingen niet te zijn omgeven door planeten of ander materiaal. Dit duidt erop dat de stofschijven rond deze sterren volledig zijn opgelost.

De baanbrekende ontdekking van de eerste planeet in omloop rond een andere ster dan de Zon (de ster 51 Peg), nu zo'n 15 jaar geleden, heeft er toe geleid dat er nu ongeveer 500 exoplaneten bekend zijn. Deze grote verzameling van exoplaneten, die men kan zien als de ultieme eindproducten van de evolutie van de protoplanetaire schijven beschreven in dit proefschrift, bevat een enorme bron van informatie. De verdelingen van planeetmassa's en andere parameters die hun banen rond de centrale ster bepalen zijn bijvoorbeeld erg belangrijk voor het testen van modellen die het

ontstaan van planeten beschrijven.

Er is echter maar één planetenstelsel waarvan we de precieze details over de bewegingen en de samenstelling van haar leden echt goed kunnen bestuderen: ons eigen zonnestelsel. Het zonnestelsel bevat een grote hoeveelheid aan objecten die het oermateriaal waaruit het vroege zonnestelsel bestond geconserveerd hebben gedurende de laatste 4.5 miljard jaar. Analyse van de samenstellingen en mineralogische eigenschappen van deze chondritische meteorieten, interplanetaire stofdeeltjes, en kometen wijst op bepaalde fysische en chemische processen die van groot belang waren gedurende de eerste fase van de evolutie van de protoplanetaire schijf. Het onderzoek naar deze eerste fase van de evolutie, die samenhangt met de fase waarin de planeten nog volop in ontwikkeling waren, is een cruciaal onderzoeksterrein binnen de sterrenkunde en het onderwerp van Hoofdstuk 6 van dit proefschrift.

De Diversiteit van Protoplanetaire Schijven en hun Evolutie

De lancering van de Spitzer Ruimtetelescoop was een belangrijke mijlpaal in de studie van (proto-)stellaire schijven. Alhoewel dit soort objecten al eerder waren bestudeerd met onder andere de ISO telescoop, heeft de gevoeligheid en snelheid waarmee Spitzer zijn metingen uitvoert het mogelijk gemaakt om grote aantallen schijven nauwkeurig te analyseren. Gecombineerd met nieuwe waarnemingen op ultraviolette, visuele en submillimeter golflengten heeft dit ertoe geleid dat een groot aantal nieuwe soorten schijven in verschillende stadia van hun evolutie konden worden ontdekt en bestudeerd.

Voordat het Spitzer project begon, was onze kennis over de stofschijven vrij beperkt en gebaseerd op relatief kleine aantallen objecten. De modellen die beschrijven hoe de evolutie van stofschijf tot planeten tot stand komt waren dan ook veelal gebaseerd op de aanname dat de eigenschappen van de helderste (en dus de makkelijkst waarneembare) schijven representatief zijn voor de gehele schijfpopulatie. Ook werden gegevens over ons eigen zonnestelsel gebruikt, als mede het empirische bewijs dat stofschijven verdwenen zijn rond sterren met leeftijden van een paar miljoen jaar. Het algemene beeld van de evolutie van de stofschijven was dan ook dat de schijven gestaag evolueren doordat het schijfmateriaal naar de ster toe valt, doordat het oplost ten gevolge van het stralingsveld van de ster, of door het samenklonteren van steeds grotere stofdeeltjes.

Het ontstaan van reuze-planeten wordt voor een belangrijk deel bepaald door de leeftijd van het gasvormige gedeelte van de schijf. Dit gas is moeilijk waarneembaar, maar kan toch indirect bestudeerd worden omdat het vaak samengaat met kleine stofdeeltjes die makkelijker waarneembaar zijn. De levensduur van de schijf wordt vaak afgeleid uit de overmaat aan infrarood licht. Het referentiepunt dat gebruikt wordt om te bepalen in welke fase van evolutie een bepaalde stellaire schijf zich bevindt is de leeftijd van de ster. Verschillende onderzoeken hebben laten zien dat de fractie van sterren met een stofschijf afneemt naar mate de gemiddelde leeftijd van een groep sterren hoger wordt. Dit betekent dat de leeftijd van de ster dus een belangrijke

parameter is. Na 6 tot 8 miljoen jaar hebben minder dan 10% van de sterren nog een stofschiif. Tijd is echter niet de enige parameter waar de evolutie van de schijf door bepaald wordt. In zowel jonge (rond de 1 miljoen jaar) als in oude groepen (rond de 7 miljoen jaar) bestaat er een grote diversiteit aan de overmaat van infrarood licht wat samenhangt met de aanwezigheid van verschillende hoeveelheden stof. Het is niet precies duidelijk waarom sommige schijven na 1 of 2 miljoen jaar verdwenen zijn, terwijl andere wel tot 10 miljoen jaar kunnen bestaan.

Mogelijk zijn vele andere factoren belangrijk voor het evolutieproces van protoplanetaire stofschiiven. Zo is het bijvoorbeeld bekend dat de leeftijden van schijven afhangen van de massa van de centrale ster; mogelijk hangt dit samen met een snellere verspreiding van het stof in de schijven rond zwaardere sterren. Jonge sterren vertonen een grote variatie in oppervlaktetemperatuur, helderheid en massa's. Omdat gedurende de protoplanetaire fase de schijven en sterren nauw met elkaar verbonden zijn, is het goed mogelijk dat de variatie in deze stereigenschappen zich ook in de eigenschappen van hun omringende materie weerspiegelt. Het is echter nog niet bekend welke processen precies verantwoordelijk zijn voor de tijdsduur waarop protoplanetaire schijven verdwijnen.

Protoplanetaire schijven - de kraamkamers van planeten - bieden een buitengewone kans om het proces van planeetvorming te onderzoeken. Om de verschillende factoren die bijdragen aan dit proces vast te stellen, zijn systematische studies van grote aantallen protoplanetaire schijven nodig. We weten inmiddels dat het evolutieproces heel verschillend kan verlopen voor verschillende protoplanetaire schijven. Het is echter nog steeds een mysterie welke verschillende paden mogelijk zijn en door wat die bepaald worden.

Dit Proefschrift

Dit proefschrift beschrijft een representatief onderzoek naar jonge, lage-massa sterren en hun stofschiiven in een aantal nabijgelegen stervormingsgebieden. Dit onderzoek is gedaan met optische en infrarode telescopen, waarmee de evolutie van het stof in proto-planetaire schijven nauwkeurig onderzocht kan worden. Het volledige ster-schiif systeem wordt onderzocht: de eigenschappen van de sterren en hun invloed op de evolutie van de schijven, en de veranderingen die het stof ondergaat. Het onderzoek is gebaseerd op statistisch relevante samples. De indeling van dit proefschrift is als volgt:

Hoofdstuk 2 – In dit hoofdstuk wordt een optisch, spectroscopisch onderzoek gepresenteerd teneinde de eigenschappen te bepalen van de nieuwe populatie jonge sterren die ontdekt is in de moleculaire wolk “Serpens”. De spectraaltypen, en dus de effectieve temperaturen, worden bepaald aan de hand van de sterspectra. Vervolgens worden deze gecombineerd met optische en infrarode fotometrische waarnemingen en wordt de absolute helderheid van de sterren (en dus hun positie in het Hertzsprung-Russell diagram) bepaald. De verontreiniging van het sample door achtergrond-objecten (sterren en sterrenstelsels) is vrij hoog (25%), wat aantoont dat

men voorzichtig moet zijn met het selekteren van jonge stellaire objecten (YSOs) op grond van infrarood kleuren in wolken op lage galactische breedte. Met behulp van sterevolutie-modellen worden leeftijden gevonden voor de sterren in de wolk van 2 tot 6 miljoen jaar en massa's van 0.2 tot 1.2 keer de massa van de Zon (onder de aanname dat de Serpens wolk op een afstand van 259 parsec staat). Uit metingen van de $H\alpha$ spectraallijn wordt verder afgeleid hoeveel materie er per jaar vanaf de schijf naar de ster toe stroomt. De resultaten laten zien dat dit in meer dan de helft van de sterren een substantiële hoeveelheid is.

Hoofdstuk 3 – In dit Hoofdstuk brengen we, in navolging van Hoofdstuk 2, verslag uit van een optische spectroscopische studie in de “Lupus” wolken. Van een sample van jonge stellaire objecten worden de spectraaltypen bepaald. De sample bestaat voor ongeveer 90% uit relatief koele, laat-type M sterren. Met behulp van sterevolutie-modellen wordt een gemiddelde leeftijd gevonden van 2 miljoen jaar en een massa van slechts 0.2 zonsmassa's. De $H\alpha$ lijn geeft snelheden voor de materie-aanwas die karakteristiek zijn voor T Tauri sterren.

Hoofdstuk 4 – Dit Hoofdstuk beschrijft een omvangrijke studie naar een groot, representatief sample van spectra van jonge sterren in Serpens, waargenomen met de Spitzer IRS. De spectra worden geïnclassificeerd. In overeenstemming met het resultaat van Hoofdstuk 2 wordt aangetoond dat de achtergrondpopulatie bestaat uit sterren op een onbepaalde afstand achter de wolk, veel verder weg gelegen sterrenstelsels (te herkennen aan roodverschoven PAHs in hun spectra), en een ongeïdentificeerd object met spectraallijnen met een hoge ionisatie-graad. De verzameling van bonafide jonge stellaire objecten omvat 115 objecten, waarvan 18% uit objecten met een omhulsel (“klasse 1” objecten) en 82% uit schijven bestaat (“klasse 2” en “klasse 3” objecten”). De geometrie van de binnenschijf wordt bepaald op grond van de verhouding van de intensiteit gemeten op 30 en 13 μm . Omdat de silicaatstructuren op 10 en 20 μm sterk afhankelijk zijn van de afmeting van de stofdeeltjes door welke ze geproduceerd worden, gebruiken we deze banden om de typische afmetingen te schatten. We vinden een populatie van kleine stofkorrels aan het oppervlak van de schijven, die niet afhangt van de geometrie van de binnenschijf, of van het feit of de schijven voorkomen in sterren in een geclusterde of in een geïsoleerde omgeving. De resultaten gevonden voor Serpens worden vergeleken met die voor de jonge populatie in de veelbestudeerde Taurus wolk, en met het gehele c2d IRS sample bestaande uit jonge stellaire objecten verspreid over de hele hemel. Ondanks het feit dat deze twee andere populaties andere karakteristieke leeftijden en ster-vormingsomgevingen peilen, zijn de resultaten hetzelfde als gevonden voor Serpens. Dit toont aan dat de stofpopulatie aan het schijfoppervlak tot stand komt door een evenwicht tussen de groei en de fragmentatie van stofdeeltjes, onafhankelijk van hun omgeving. Dit evenwicht wordt in stand gehouden zolang de schijven ondoorzichtig zijn op optische en infrarode golflengten.

Hoofdstuk 5 – Hier wordt het hoge-ionisatie achtergrondobject OL17 dat werd ontdekt in Hoofdstuk 4 nader bestudeerd. We gebruiken de Very Large Telescope met de nieuwe X-shooter spectrograaf om nieuwe spectra te verkrijgen. De drie kanalen

van de X-shooter in het ultraviolet-blauw, optisch, en nabij-infrarood bestrijken vele emissielijnen die gebruikt worden om de eigenschappen van het object te onderzoeken. Smalle emissielijnen en lage verhoudingen van $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ en $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ tonen aan dat OL17 een nieuw ontdekte, stofrijke, planetaire nevel is.

Hoofdstuk 6 – Dit Hoofdstuk beschrijft details over de mineralogie van stofkorrels aan het oppervlak van stofschijven in vier clusters. Deze vier clusters zijn de jonge Serpens en Taurus wolken die het onderwerp waren van Hoofdstuk 4, en de “Upper Scorpius” en “ η Chamaeleontis” clusters die door hun hogere leeftijd een latere fase in de evolutie van stofschijven representeren. De analyse is voor alle vier de wolken op dezelfde manier uitgevoerd zodat de resultaten goed te vergelijken zijn. In alle vier gebieden zijn de verdelingen die de afmetingen en mate van kristalliniteit van de stofkorrels beschrijven nagenoeg hetzelfde, terwijl de gemiddelde leeftijd en het aantal sterren met een stofschijf van wolk tot wolk verschillen. Dit betekent dat er een snelle fase in de evolutie plaatsvindt van rond de 1 miljoen jaar of minder waarna een evenwicht in deze eigenschappen bereikt wordt totdat de schijf oplost.

Hoofdstuk 7 – In dit Hoofdstuk gebruiken we de eigenschappen van de sterren en schijven afgeleid in de voorgaande Hoofdstukken om de spectrale energieverdeling (SED) van jonge sterren met schijven in Serpens te bepalen. Deze SEDs maken het mogelijk om de straling afkomstig van de ster en de schijf nauwkeurig van elkaar te onderscheiden. Samen met de meest recente afstandsbepaling voor Serpens (415 pc) vinden we dat de karakteristieke leeftijden rond de 1 tot 3 miljoen jaar liggen. De verdelingen van de fracties van de helderheid die afkomstig is van de schijf (vergeleken met de totale helderheid afkomstig van de ster én de schijf) zijn vergelijkbaar voor Serpens en Taurus. Ook zijn de meeste schijven consistent met het scenario van passieve bestraling. In tegenstelling tot de meer massieve Herbig Ae/Be sterren wordt geen aanmerkelijk verschil gevonden tussen de fractionele schijfhelderheden in brede en platte schijven rond T Tauri sterren. Tenslotte vinden we dat in onze grote sample, de mineralogische eigenschappen van het stof aan het schijfoppervlak niet direct gecorreleerd zijn aan de eigenschappen van de sterren of die van de schijven.

Conclusies

Elk hoofdstuk wordt afgesloten met een reeks conclusies gebaseerd op de bestudeerde data. De belangrijkste van de conclusies uit dit proefschrift zijn:

- Serpens en Lupus zijn allebei jonge stervormings-gebieden met een mediane leeftijd rond de anderhalf tot drie miljoen jaar (onder de aanname dat de afstand tot Serpens 415 in plaats van 259 parsec is). Alhoewel de verdelingen van de leeftijden van de sterren in deze twee wolken vergelijkbaar zijn, geldt dat niet voor hun massa's. De sterren in Serpens bestaan uit G-, K-, en M-type sterren en de massa's liggen tussen 0.2 en 1.2 zonsmassa's, met een mediaan rond de 0.8 zonsmassa's. Deze verdeling is vergelijkbaar met die van Taurus. Lupus bestaat echter bijna in het geheel uit lage massa M-type sterren, met een gemiddelde massa rond de 0.2 zonsmassa's. Deze verdeling is vergelijkbaar met die gezien

in de jonge stervormings-gebieden Chamaeleon 1 en IC 348. Het verschil in de massa-verdelingen in deze diverse gebieden wijst mogelijk op een kleine variatie in de (over het algemeen genomen universele) functie die de beginmassa's van nieuwe sterren beschrijft (de "IMF").

- Voor zowel jonge clusters met een leeftijd van rond de 1 miljoen jaar, als voor oude clusters met een leeftijd van rond de 7–8 miljoen jaar, is de verdeling van afmetingen van de stofdeeltjes aan het schijfoppervlak statistisch gezien gelijkwaardig. Dit betekent dat het stof ook onderhevig is aan een destructief botsingsproces, behalve groei door klontering. Het evenwicht tussen deze twee processen kan alleen verklaard worden als zij gedurende miljoenen jaren in stand wordt gehouden tot het moment waarop de schijf verdwenen is.
- De mineralogische samenstelling van het stof is gemiddeld genomen hetzelfde in alle gebieden. De kristallijne fractie is vrij hoog (ongeveer 10 tot 20%) en wordt vrij vroeg bepaald aan het schijfoppervlak, binnen ongeveer 1 miljoen jaar. Een evenwicht wordt bereikt onafhankelijk van wat er gebeurt in het middenvlak van de schijf, waar de planeten mogelijk gevormd worden.