

Nederlandse samenvatting

Meervoudige sterren, groepen van 2 of meer sterren die bij elkaar gehouden worden door de onderlinge zwaartekracht, komen veel voor in het universum. Bepaalde karakteristieken van deze stergroepen, zoals de veranderlijke helderheid, hebben er toe geleid dat deze sterren een belangrijke culturele rol speelde in de oudheid. Sindsdien zijn deze meervoudige sterren onderwerp van wetenschappelijk onderzoek geweest en met de komst van de telescoop is de kennis van deze objecten toegenomen. Door de verbeterde techniek om het universum te observeren, hebben we ontdekt dat meervoudige sterren verantwoordelijk zijn voor een groot aantal belangwekkende fenomenen, van supernovae en planetaire nevels tot samensmeltingen tussen zwarte gaten. Meervoudige sterren spreken tot de verbeelding en zijn veelvuldig het onderwerp van sciencefiction, in woord en beeld. Men vraagt zich af wat voor planeten in dit soort systemen kunnen voorkomen, en hoe een dageraad met meerdere sterren er uit zal zien. Recente observaties van ruimte missies zoals de Kepler satelliet hebben laten zien dat planeten rond meervoudige sterren kunnen bestaan. Dit leidt tot de vragen: hoe vorm je een meervoudig systeem en wat zorgt er voor dat een meervoudig systeem stabiel is. De eerste theorieën stelden voor dat één ster een andere ster uit zijn baan trok om een dubbel ster te vormen. Deze theorieën hadden grote tekortkoming. Zo moet een groot aantal sterren zich zeer dicht bij elkaar bevinden en is het nodig dat een derde ster het systeem stabiliseert. Een beter begrip van de vorming en evolutie van sterren is nodig om de vragen rond de formatie van meervoudige sterren op te lossen.

Wat men heeft geleerd uit observatie en modellen over het proces van stervorming kan als volgt kort worden samengevat. Roterende wolken van dicht gas en stof kunnen, onder de juiste condities, samentrekken om in het binnenste van de wolk een protosterren te vormen. Deze ster in wording is dan nog ingekapseld door een grote hoeveelheid gas en stof. Deze ingekapselde protosterren zijn verantwoordelijk voor energieke, zeer geconcentreerde uitstromen, een kenmerk van actieve stervorming. De rotatie en samentrekking van het materiaal naar de protoster zorgt voor de vorming van een vlakke (roterende) structuur in het gas en stof, een “schijf”. Van deze schijf wordt verwacht dat die vroeg in het stervormingsproces vormt. Uit deze schijf worden uiteindelijk de planeten en kometen gevormd. Met het verstrijken van de tijd groeit de protoster en verandert de interne structuur, tegelijkertijd verdwijnt er materiaal uit de wolk van gas en stof waar de ster uit aan het vormen is. Dit komt zowel door de accretie van materiaal op de ster, als door de krachtige uitstromen die een deel van de wolk weg duwen. Als al originele gas en stof uit de omgeving verdwenen is, houden we een enkele jonge ster en planeten, als die gevormd zijn, over. Waarnemingen van protosterren, van de diepst ingekapselde protosterren tot de jonge sterren, laat zien dat meervoudige sterren veel voorkomen. Dit wijst er op dat de meeste sterren als

deel van een meervoudige ster worden gevormd en dat dus ons beeld van stervorming moet worden herzien. Het feit dat meervoudige sterren als zodanig worden gevormd, roept een wirwar van vragen op. Dit proefschrift richt zich op een aantal van deze open vragen rond de formatie en evolutie van meervoudige protosterren, namelijk:

1. Wanneer vormen schijven en hoe beïnvloeden ze de meervoudige protosterren?
2. Vormen alle sterren in een meervoudige sterren groep op hetzelfde moment?
3. Welke factoren verhogen of verlagen vormingsefficiëntie van meervoudige protosterren
4. Hoe vergelijkt de structuur, zowel fysisch als chemisch, van het kapsel van enkele en meervoudige protosterren zich.

De eerste vraag wekt interesse omdat schijven, naast dat ze de uiteindelijke locatie van planeet en komeet vorming zijn, ook een belangrijke rol kunnen spelen in de vorming van een meervoudige ster in de eerste stadia van het stervormingsproces. De volgende twee vragen moeten inzicht geven in het processen waardoor meervoudige sterren vormen. Er wordt gedacht dat meeste meervoudige sterren vormen door het fragmenteren van de geconcentreerde wolk waaruit een ster kan vormen. Door het fragmenteren vormt deze wolk niet één maar meerdere sterren. Het is nog niet duidelijk, wanneer deze fragmentatie gebeurd en wat er toe leidt dat de wolk fragmenteert en een meervoudige ster vormt, en wat de effecten zijn op de evolutie van deze protosterren. De vierde vraag zoekt inzicht naar de verschillen in structuur rond vormende protosterren en of deze verschillen het product zijn van de meervoudigheid van een deel van deze systemen of dat een ander proces voor deze verschillen verantwoordelijk is.

Met als doel deze vier vragen te beantwoorden worden waarnemingen van moleculen en stof gecombineerd met fysische en chemische modellen om de structuur van de ingekapselde protosterren te beschrijven. De emissie van het stof wijst op de locatie van de protoster en uit de emissie kan het stadium van de evolutie van de protoster worden afgeleid. Moleculen zijn belangrijk omdat de emissie lijnen gebruikt kunnen worden om de kinetische structuur te bepalen, de temperatuur en dichtheid van het gas te bepalen en omdat de chemische structuur van de geobserveerde protosterren kan worden bepaald. Verder kan de chemie ons helpen in het begrijpen van processen die plaats vinden in het universum.

Dit proefschrift

Hoofdstuk 1 van dit proefschrift bevat een gedetailleerde introductie tot het huidige begrip van stervorming van zowel enkele als meervoudige sterren. De observaties die in dit proefschrift worden gepresenteerd spannen het elektromagnetisch spectrum van millimetergolven tot het nabije infrarood. Zowel observaties vanaf de grond als vanuit de ruimte zijn gebruikt. De *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*, ook wel bekend als ALMA, is een radio interferometer die staat op het Chajnantor plateau in de Atacama woestijn in Chili. ALMA is gebruikt om de chemische and fysische structuur van meervoudige protosterren op schalen van 100 astronomische eenheden (1 astronomische eenheid is de gemiddelde afstand tussen de zon en de aarde) waar te nemen. Het *Atacama Pathfinder Experiment* (APEX), gesitueerd op hetzelfde plateau als ALMA, is een schotel antenne die gebruikt is om protosterren op schalen van wolk

kernen (1000 AE) te bestuderen. Uit de archieven van de *Herschel Space Observatory* en de *Spitzer Space Telescope* zijn de helderheidskaarten gebruikt.

Hoofdstuk 2 richt zich op de vraag wanneer schijven vormen. Voor dit doel is een zeer jonge ingekapselde protoster bestudeerd, VLA 1623-2417. VLA 1623-2417 is een drievoudige protoster in het midden van ρ Ophiuchus op een afstand van 391 lichtjaar. De drie componenten verschillen significant, waarschijnlijk omdat alle drie de protosterren zich in een ander evolutionair stadium bevinden. Een van de componenten, VLA 1623-2417 A, heeft een vlakke schijfachtige structuur die zichtbaar is in zowel het stof als in de moleculaire lijn emissie. De studie van de kinematica van $C^{18}O$ met een simpel model wijst erop dat de emissie inderdaad afkomstig is van een roterende schijf, met een straal van ongeveer 150 astronomische eenheden, vijf keer zo groot als de afstand tussen Neptunus en de zon. Omdat VLA 1623-2417 A een hele jonge, diep ingekapselde protoster is, is het bestaan van deze schijf bewijs van de vroege formatie van deze structuren tijdens het stervormingsproces.

Roterende schijven kunnen vroeg in het stervormingsproces vormen, zoals beschreven in Hoofdstuk 2. Het is daarom te verwachten dat deze schijven ook effect hebben op de evolutie van de protoster. Dit onderwerp wordt behandeld in Hoofdstuk 3, door het materiaal rond de roterende schijf van VLA 1623-2417 A te bestuderen. Het molecuul DCO^+ wordt gebruikt om het koude materiaal van VLA 1623-2417 A in kaart te brengen, omdat dit molecuul vooral wordt gevormd bij temperaturen onder de 20 K. Een simpel chemisch model is gebruikt om de DCO^+ emissie te analyseren. De positie van de geobserveerde DCO^+ emissie is dichter de protoster dan verwacht uit een sferisch symmetrische dichtheids- en temperatuurstructuur. Dit zou het geval zijn als de protoster de directe omgeving in alle richtingen gelijkmatig zou opwarmen. Daarentegen wordt de DCO^+ emissie dicht bij de protoster gevonden in het verlengde van de roterende schijf, maar niet in de richting van de bipolaire uitstroom. De reden hiervoor is dat de schijf zorgt voor een lagere temperatuur aan de buitenste rand van de schijf omdat de schijf een schaduw slaat op het achterliggende materiaal waardoor dat minder opgewarmd kan worden door de protoster. Dit is een indicatie dat de aanwezigheid van de schijf een significant effect heeft op het omliggende materiaal door zowel de temperatuur als chemische structuur te veranderen.

De fysisch-chemische structuur van ingekapselde protosterren wordt verder bestudeerd in Hoofdstuk 4 met behulp van moleculen die het koude en warme gas van protostellaire wolkenkernen in kaart kunnen brengen. Twee meervoudige protosterren, IRAS 16293-2422 en VLA 1623-2422 worden bestudeerd. Beide systemen zijn te vinden in de ρ Ophiuchus wolk en zijn zeer diep ingekapseld in hun natale wolkenkern. IRAS 16293-2422 is een zeer heldere dubbelle protoster, terwijl VLA 1623-2417 de zwakkere drievoudige protoster is die ook al bestudeerd is in Hoofdstukken 2 en 3. VLA 1623-2417 A heeft een roterende schijf (Hoofdstuk 2) en ook IRAS 16293-2422 A wordt omgeven door een grote, vlakke schijfachtige structuur met een straal van ongeveer 200 astronomische eenheden. De andere bronnen in deze systemen hebben geen bevestigde schijfachtige structuren. Het koude gas wordt in kaart gebracht met emissie van de moleculen DCO^+ , N_2H^+ en N_2D^+ . Al deze moleculen vormen bij temperaturen onder de 20 K en zijn dus het meest aanwezig in de koudste delen van het gas. Voor het in kaart brengen van de warmere omgeving met temperaturen tussen de 50 en 100 K of het deel van het gas dat door de protoster wordt belicht met UV straling worden de moleculen $c-C_3H_2$ en C_2H gebruikt. De “koude” moleculen worden dichtbij de verschillende objecten gevonden door de aanwezigheid van de schijf-achtige structuren,

maar alleen in het verlengde van de schijf. N_2H^+ en N_2D^+ zijn niet gedetecteerd in VLA 1623-2417, dit komt waarschijnlijk door de zeer lage temperaturen, onder de 10 K, veroorzaakt door de schijf die het omliggende materiaal afschermt van de protoster. Dit komt overeen met de resultaten gepresenteerd in Hoofdstuk 3. Het “warme” molecuule $c\text{-C}_3\text{H}_2$ volgt de rand van de holte gecreëerd door de uitstroom in beide meervoudige protosterren. Dit is consistent met de aanwezigheid van dit molecuul in warm en UV-belicht gas. In het algemeen zijn $c\text{-C}_3\text{H}_2$ en C_2H aanwezig in hetzelfde gebied. Dit geldt voor VLA 1623-2417 maar niet voor IRAS 16293-2422. Een interessant resultaat van deze studie is dat de meervoudigheid van deze systemen geen significant effect lijkt te hebben op de structuren rond de protosterren, alhoewel hier nog veel onderzoek naar gedaan moet worden.

In Hoofdstuk 5 wordt de vraag of alle sterren in meervoudige stergroepen op hetzelfde moment gevormd worden onder de loep genomen. Om deze vraag te beantwoorden, worden ingekapselde protosterren bestudeerd, in plaats van protosterren in een later stadium van het stervormingsproces. Bij ingekapselde protosterren zijn de omstandigheden van de formatie bijna volledig intact, terwijl protosterren in latere stadia significante veranderingen in de omgeving hebben veroorzaakt. Het bestuderen van de jongste protosterren komt met een ander probleem: de leeftijden van ingekapselde protosterren zijn bijna onmogelijk om met zekerheid te bepalen. In het algemeen wordt het evolutionaire stadium, oftewel de “leeftijd”, van een protoster bepaald aan de hand van de distributie van de lichtkracht als functie van de golflengte van het licht. Dit staat in de literatuur bekend als de “Spectral Energy Distribution (SED)”. Gedurende het ingekapselde stadium is de helderheid van de protoster vooral geconcentreerd op de lange golflengten door het kapsel van stof waarin de protoster gevormd wordt. Terwijl de protoster groeit, verdunt de wolk kern die het kapsel van de protoster vormt waardoor meer en meer licht op korte golflengte ons kan bereiken. Op het moment dat de protoster een ster wordt en waterstof gaat verbranden, wordt het grootste deel van het licht uitgezonden in het optische deel van het spectrum. Het is moeilijk om aan een SED een precieze leeftijd vast te plakken. Het is daarentegen relatief makkelijk om twee SEDs te vergelijken en te bepalen of de objecten in hetzelfde stadium van de evolutie zijn of niet. Deze relatieve leeftijdsmeting is gebruikt om te bepalen of alle sterren in een meervoudig systeem op hetzelfde moment zijn gevormd. De SEDs voor alle geïdentificeerde protosterren in de Perseus moleculaire wolk (afstand 750 lichtjaar) zijn geconstrueerd met data uit de literatuur en uit helderheidskaarten uit de archieven van de *Herschel Space Observatory*. De SEDs van de componenten van de meervoudige systemen kunnen alleen worden onderscheiden als de afstand tussen de componenten minstens 1600 astronomische eenheden bedraagt, de resolutie van de *Herschel Space Observatory*. De oriëntatie van de protoster ten opzicht van onze zichtlijn heeft effect op de waargenomen SEDs. Een protoster die een uitstroom heeft die in de richting van onze zichtlijn staat kan worden gezien als ouder omdat het kapsel niet zichtbaar is. Daarom moet de oriëntatie van de protosterren, samen met de SEDs en fysische structuur mee genomen worden om te kunnen concluderen of alle sterren in een meervoudig systeem op hetzelfde moment zijn gevormd. Het resultaat van dit onderzoek is dat in een derde van de meervoudige protosterren de componenten niet op hetzelfde moment gevormd zijn. Dat wil zeggen dat sommige wolk kernen nog nieuwe protosterren vormen zelfs nadat ze al één of twee protosterren hebben gevormd, terwijl dat bij andere wolk kernen niet gebeurt. Dit is belangrijke informatie voor de theorie en modellen van meervoudige ster vorming, en roept op hetzelfde moment de vraag op,

wat zorgt er voor dat sommige meervoudige protosterren doorgaan met het vormen van nieuwe protosterren.

Hoofdstuk 6 onderzoekt een van de mogelijk factoren die invloed kunnen hebben op meervoudige stervorming: temperatuur. Modellen die het opwarmen van het gas en stof door de centrale protoster meenemen, suggereren dat als een protoster eenmaal gevormd is, het verwarmde gas en stof niet verder zou kunnen fragmenteren. Daarentegen suggereren de resultaten in Hoofdstuk 5 dat er andere factoren zijn die fragmentatie en het vormen van meervoudige sterren beïnvloeden. Om te onderzoeken of er een relatie is tussen temperatuur en fragmentatie, wordt het gas en stof op schalen van 1000 astronomische eenheden onderzocht. Observaties met de enkele antenne van APEX worden gebruikt om moleculen te observeren die dienst doen als thermometers, zoals DCO^+ en H_2CO . Daarnaast worden ook moleculen waargenomen die oplichten in de regio die wordt opgewarmd door de protoster, zoals $c\text{-C}_3\text{H}_2$ en C_2H . Deze moleculen worden waargenomen op zichtlijnen in de richting van een aantal geselecteerde protosterren in de Perseus moleculaire wolk. De selectie bevat zowel enkele als meervoudige protosterren. Omdat zowel enkele als meervoudige systemen worden waargenomen is het mogelijk om deze te vergelijken, wat kan helpen om de precieze rol van de temperatuur in het vormingsproces van meervoudige sterren. De observaties en de temperatuur kaarten die afgeleid zijn van de waargenomen moleculen, laten zien dat er geen duidelijke relatie is tussen temperatuur en enkele of meervoudige sterren. Er wordt juist gevonden dat meervoudige protosterren een groter reservoir van koud gas om zich heen hebben in vergelijking met enkele protosterren. Deze waarneming suggereert dat massa en dichtheid, in tegenstelling tot temperatuur, een belangrijke rol spelen in fragmentatie en als gevolg daarvan, in de formatie van meervoudige protosterren.

Conclusie

De resultaten van dit proefschrift dragen belangrijke stukjes bij aan de puzzel van meervoudige stervorming. Deze worden hier kort samen gevat. Grote schijven kunnen in een vroeg stadium van het stervormingsproces vormen en kunnen de fysisch-chemische structuur van protosterren beïnvloeden. Dit is belangrijk voor stervorming in het algemeen omdat het ons beeld van de stervormingsprocessen verandert. Daarnaast kunnen beide factoren, schijven en fysisch-chemische structuur, de formatie van meervoudige protosterren beïnvloeden omdat ze invloed hebben op de fragmentatie. Niet alle protosterren in een meervoudig systeem vormen op hetzelfde moment. Dit is een indicatie dat in sommige gevallen, de omstandigheden in de wolk kern zodanig zijn dat verdere fragmentatie, nadat er al een protoster gevormd is, mogelijk is. Deze omstandigheden zijn niet gerelateerd aan de temperatuur maar zouden wel gerelateerd kunnen zijn aan de massa en dichtheid. De resultaten uit dit proefschrift zijn een stap vooruit in ons begrip van de vorming van meervoudige protosterren, maar de weg is nog lang. Het zou bijvoorbeeld interessant zijn om uit te zoeken of de resultaten gevonden voor de Perseus moleculaire wolk ook gelden voor andere stervormingsgebieden. Onze visie over het proces van stervorming zou moeten worden herzien om ook meervoudige stervorming uit te kunnen leggen, omdat het een zeer veel voorkomende uitkomst van het stervormingsproces is. Modellen en theorieën moeten worden aangepast aan de uitkomsten van observaties, zodat de uitkomsten van de modellen een nieuwe richting aan kunnen geven voor verder observaties.