Nederlandse samenvatting

De moleculaire omgeving van lage-massa protosterren

1. Het ontstaan van sterren

Voor een menselijke waarnemer lijkt de sterrenhemel onveranderlijk, op de bewegingen van de planeten en de verschijning van kometen na. Toch hebben sterren slechts een eindige levensduur. Ze ontstaan door het ineenstorten van wolken gas en stof die verspreid liggen door de Melkweg, en na een bestaan van tientallen miljoenen tot miljarden jaren doven ze uit, doorgaans nadat ze een groot deel van hun massa hebben weggeblazen. Dit materiaal, verrijkt met restproducten van kernfusie zoals koolstof en zuurstof, keert terug naar interstellaire wolken, waaruit weer nieuwe sterren ontstaan. In dit proefschrift bestuderen we de vorming van sterren met een massa tot 2 à 3 maal die van de zon (één zonsmassa = 1 $M_\odot$ = 2×10^{30} kg), zogenaamde lage-massa sterren. In het bijzonder bekijken we de structuur van het omhulsel van gas en stof rond de protoster, de aanwezigheid van een schijf rond de ster — als mogelijke voorloper van een planetenstelsel —, en de invloed van de bipolaire massa-uitstroom die een belangrijke rol speelt in het stervormingsproces. Hierbij maken we gebruik van de microgolfstraling van moleculen en stof om de dichtheid, temperatuur, en beweging van het materiaal te achterhalen.

1.1 Het stervormingsproces in grote lijnen

Figuur 1 van dit hoofdstuk geeft een schematisch overzicht van de vorming van een lage-massa ster vanaf de oorspronkelijke verdichting in een interstellaire wolk tot het moment waarop waterstoffusie op gang komt en de ster zijn volwassen bestaan begint.

(a) Interstellaire wolken hebben een sterk inhomogene structuur, waarbij de wolk als geheel is opgebouwd uit een reeks van subcondensaties van toenemende dichtheid op steeds kleinere schaal. Zwakke magneetvelden en turbulente bewegingen in het gas behoeden de wolk en zijn subcondensaties voor ineenstorting onder hun eigen zwaartekracht. Deze ondersteuning is echter niet perfect: turbulente bewegingen kunnen afnemen door botsingen van gasmoleculen, terwijl magneetvelden uitsluitend geladen deeltjes zoals elektronen en ionen beïnvloeden; de neutrale moleculen ondervinden alleen door botsingen met deze geladen deeltjes de aanwezigheid van het magneetveld. Het gevolg is dat op een tijdschaal van enkele miljoenen jaren condensaties in interstellaire wolken kunnen ontstaan met een dichtheid die sterk inwaarts toeneemt.

(b) Op een gegeven moment kan de dichtheid in het centrum van de condensatie zo groot worden, dat de eigen zwaartekracht sterker wordt dan de ondersteunende kracht van magneetveld of turbulentie, en het in korte tijd ($<$ 1000 jaar) ineenstort tot een

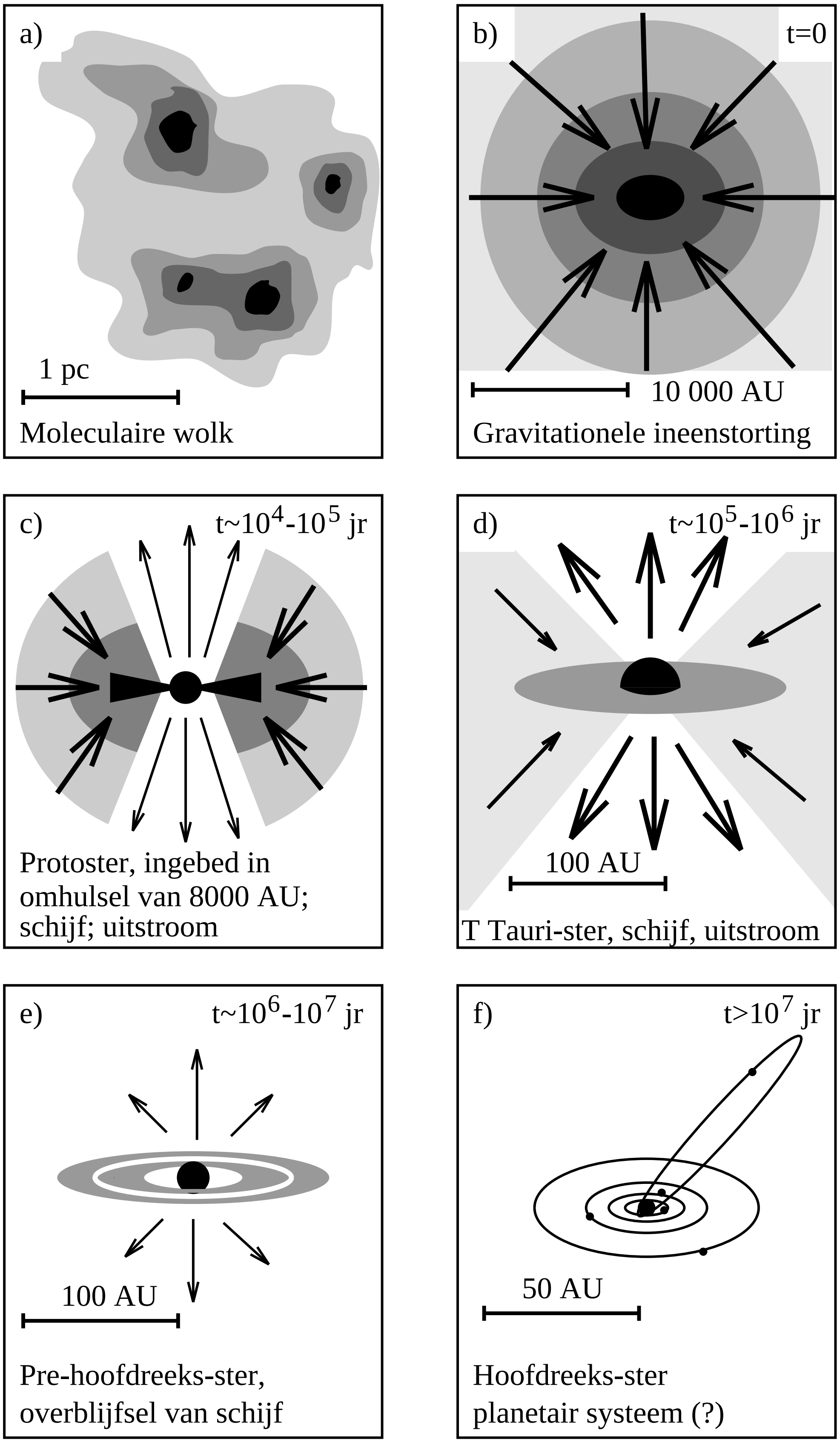

Fig. 1. *Schematisch overzicht van de vorming van een lage-massa ster.*

protoster. Een schokgolf veroorzaakt door het wegvallen van het onderliggend materiaal plant zich naar buiten toe voort, waarna ook meer naar buiten gelegen gas naar binnen begint te vallen. Dit is de zogenaamde *inside-out collapse*.

(*c*) Gedurende de volgende 10.000 jaar bevindt zich in het midden van een omhulsel van gas en stof een zogenaamde protoster, omringd door een schijf met een doorsnede van 10–100 AU (1 AU = 1 astronomische eenheid = de afstand van de aarde tot de zon = 150 miljoen km). Materiaal dat vanuit een langzaam draaiende wolk naar de protoster toe valt, zal steeds sneller gaan roteren, net zoals een kunstschaatser die sneller om zijn as gaat draaien wanneer hij zijn armen naar zich toe trekt. Het materiaal, dat hierdoor belet wordt direct op de ster te vallen, vormt een circumstellaire schijf. Viscositeit en andere processen zorgen er vervolgens voor dat het gas door de schijf naar binnen spiraliseert. Een van die processen is waarschijnlijk bipolaire massa-uitstroom. Dit laatste blijkt een universeel fenomeen te zijn van accretieprocessen zoals de vorming van sterren: een klein gedeelte ($< 1\%$) van de instromende massa wordt met grote snelheid langs de rotatie-as uitgestoten, en draagt daarbij het overtollig impulsmoment weg. Het exacte mechanisme achter deze uitstroom is niet bekend, maar een belangrijke rol lijkt weggelegd voor interactie van het magneetveld van de ster met de schijf. Langs de rotatie-as van lage-massa protosterren wordt materiaal uitgestoten in een nauwe straalstroom of *jet* met een snelheid van ongeveer 200 km s^{-1}. De uitstroom sleurt omliggend moleculair materiaal mee tot snelheden van enkele tientallen km s^{-1}, en veegt zo een kanaal schoon. Het is aannemelijk dat de massa-uitstroom op deze manier verantwoordelijk is voor de uiteindelijke beëindiging van massa-inval, en de verwijdering van het resterende gas en stof. Tot dit moment, circa 100.000 jaar na het begin van de ineenstorting, is de centrale ster geheel verduisterd in zichtbaar licht door het omringende stof.

(*d*) Als de jonge ster waarneembaar is geworden in zichtbaar licht, spreken we van een T Tauri ster, vernoemd naar het prototype T Tauri. De ster is nog steeds omringd door een schijf, waaruit materiaal instroomt naar de ster, zij het met een langzaam afnemend tempo. De typische afmetingen van deze schijven zijn vergelijkbaar met die van ons zonnestelsel, en bevatten voldoende massa om een planetenstelsel uit te vormen.

(*e*) Na ongeveer 1 miljoen jaar is alle massa-instroom gestopt, en krimpt de ster langzaam tot zijn uiteindelijke grootte. De dichtheid en temperatuur in het binnenste van de ster lopen hierbij op, tot na circa 10 miljoen jaar waterstoffusie op gang komt. Het resterende materiaal in de circumstellaire schijf kan intussen aaneen groeien tot een aantal planeten (*f*).

1.2 Onbeantwoorde vragen

De grote lijnen van het stervormingsproces zoals hierboven geschetst zijn goed bekend. Vooral de optisch waarneembare fasen van T Tauri ster en later zijn uitgebreid bestudeerd, alhoewel ook daar nog interessante vragen onbeantwoord zijn over de evolutie van de schijf en de mogelijke vorming van planeten. Veel minder is bekend over het verloop van de eerdere fasen, waarbij de ster volledig verduisterd is in zichtbaar licht. Deze stadia zullen we dan ook nader onderzoeken in dit proefschrift. Belangrijke, onbeantwoorde vragen zijn bijvoorbeeld: Wanneer ontstaat de circumstellaire schijf, en wat is zijn evolutie? Hoe vergelijkt de waargenomen structuur van het gasomhulsel zich met theoretische voorspellingen voor de ineenstorting van interstellaire wolken? Hoe hangt de structuur van het omhulsel en zijn evolutie af van de massa van de ster die gevormd wordt? In hoeverre spelen rotatie en magnetische velden een rol bij de inval en accretie van materiaal? Wat is het drijvende mechanisme achter de bipolaire uitstroom, en wat is zijn invloed op de structuur van het omhulsel? Meer dan de helft van jonge sterren zijn onderdeel van een dubbelster-systeem. Wat is de invloed van multipliciteit op de structuur van het omhulsel, en op de vorming en evolutie van een schijf?

Het vormingsproces getoond in Fig. 1 is dat voor een geïsoleerde ster. In de donkere moleculaire wolken verspreid door de Melkweg lijkt dat inderdaad de overheersende manier van stervorming te zijn. In de veel massievere *giant molecular clouds* of GMCs worden in één keer vele tientallen sterren gevormd, waaronder ook vaak enkele zware sterren ($> 3\ M_\odot$). Het is aannemelijk dat de nabijheid van veel andere sterren een belangrijke invloed heeft op de verschillende stadia van het vormingsproces. Zeker de aanwezigheid van sterren met $> 10\ M_\odot$ is van belang, omdat deze door hun hoge temperatuur een grote hoeveelheid ultraviolet licht uitzenden. Dit is in staat om moleculen te vernietigen, en circumstellaire schijven te doen verdampen. Deze GMCs zijn echter veel schaarser dan donkere moleculaire wolken, en het is niet bekend welke van de twee wolken de dominante bijdrage levert aan lage-massa sterren in de Melkweg als geheel.

De genoemde ultraviolette straling is één van de aspecten waarin de vorming van massieve sterren belangrijk verschilt van die van lage-massa sterren. Een ander aspect is dat waterstoffusie in massieve sterren al begint als deze nog omringd zijn door een grote hoeveelheid gas en stof. De ontwikkeling zal daarom in detail verschillen van die getoond in Fig. 1. Verder zijn zware sterren veel schaarser dan lage-massa sterren, en staan dus over het algemeen op een grotere afstand van de aarde. Dit maakt dat de vorming van massieve sterren veel lastiger te bestuderen is. Dit proefschrift beperkt zich tot de vorming van lage-massa sterren, en bekijkt één wolk waarin geïsoleerde stervorming plaatsvindt, en één waarin in één keer een cluster van sterren wordt gevormd.

2. Methoden en technieken

2.1 Moleculen en elektromagnetische straling

Bij de bestudering van interstellaire wolken kunnen we de straling van moleculen op millimeter en submillimeter golflengten (3 tot 0.4 mm) gebruiken om fysische condities als temperatuur en dichtheid te bepalen. Deze golflengtes zijn lang genoeg om door te dringen in de dichte wolk van gas en stof die de ster omringt. Omdat moleculen alleen straling uitzenden op bepaalde golflengten kunnen we uit de waargenomen golflengtes de snelheid van het gas langs de gezichtslijn achterhalen: net als de geluidsgolven van de sirene van een passerende ambulance worden elektromagnetische golven samengedrukt (d.w.z., kortere golflengte) bij nadering en uitgerekt (langere golflengte) bij verwijdering. Verder vertellen de verschillende waargenomen soorten moleculen ons iets over de chemische reacties die optreden in het gas rondom de vormende ster.

De interne energie van moleculen kent, net als die van atomen, slechts discrete waarden, zogenaamde energieniveaus, waartussen alleen een beperkt aantal overgangen zijn toegestaan. Voor moleculen kunnen we drie verschillende soorten energieniveaus onderscheiden, gekoppeld aan verschillen in rotatie van het molecule als geheel, trilling van de banden tussen de individuele atomen, en de energie van de elektronen die het molecule omringen. De energieverschillen tussen de laagste vijf à zes rotationele toestanden van moleculen als CO (koolmonoxide), HCO^+ (formyl-ion), HCN (waterstof-cyanide, blauwzuur), enzovoort, komen overeen met straling op (sub-) millimeter golflengten. Overgangen tussen de verschillende niveaus kunnen optreden door botsingen met andere moleculen, meestal met het meest voorkomende molecule H_2 (waterstof), of door emissie of absorptie van een foton. Voor deze laatste gelden een aantal regels, waarvan één de aanwezigheid is van een permanent elektrisch ladingsverschil over het molecule. Zo'n ladingsverschil kan ontstaan omdat verschillende soorten atomen de elektronen niet even sterk aan zich binden. In een CO molecule is daardoor het koolstof atoom enigszins positief geladen en het zuurstof atoom licht negatief geladen. In een di-atomair molecule als H_2 trekken beide H atomen even hard aan de elektronen, en is er geen permanent ladingsverschil. Het waterstof molecule heeft dan ook geen stralingsovergangen corresponderend met rotationele niveaus alleen, en geen spectraallijnen in het (sub-) millimeter gebied. Het CO molecule is na H_2 het meest abondante molecule, met één CO op circa 10.000 H_2 moleculen. CO wordt dan ook vaak als *tracer* van de totale hoeveelheid H_2 gebruikt.

De excitatie van rotationele niveaus boven het grondniveau kan optreden door botsingen of door absorptie van straling. Excitatie door botsingen worden bepaald door de dichtheid en temperatuur, d.w.z. de snelheid, van de botsingspartners (H_2), terwijl het sterkte van het stralingsveld wordt gegeven door emissie en absorptie door andere moleculen van dezelfde soort. Omdat ieder molecule een andere structuur heeft voor zijn energieniveaus, komt straling van verschillende moleculen en van verschillende overgangen overeen met verschillende regimes van dichtheid en temperatuur. Uit de waargenomen lijnsterkte kunnen we dus, in principe, de dichtheid en de temperatuur afleiden.

2.2 Berekeningen aan moleculaire excitatie

Om uit te rekenen welke fractie van moleculen zich in een bepaald energieniveau bevindt, moeten we een goed idee hebben van de energieniveau structuur van dat molecule, de dichtheid en de temperatuur van de wolk, en van het stralingsveld. Omdat dit laatste weer afhangt van de excitatie van datzelfde molecule in andere delen van de wolk, hebben we een gekoppeld probleem, hetgeen lastig op te lossen is. Hiervoor worden in dit proefschrift een aantal verschillende technieken gebruikt. De meest eenvoudige is dat excitatie door botsingen overheerst over excitatie door straling. De excitatie is dan in lokaal thermodynamisch evenwicht (LTE), en wordt gekarakteriseerd door één temperatuur, die van het gas. In veel gevallen echter zal de dichtheid hiervoor te laag zijn, en is excitatie en de-excitatie door straling van belang. Een veelgebruikte aanname is dat alleen de straling van nabijgelegen moleculen bijdraagt tot het stralingsveld (*escape probability*). De excitatie en het stralingsveld zijn dan alleen lokaal gekoppeld, en het probleem is relatief eenvoudig op te lossen.

In veel realistische gevallen, en zeker voor protostellaire omhulsels, heeft het stralingsveld vanuit de gehele wolk invloed op de excitatie op ieder punt in de wolk. In dat geval kunnen we een zogenaamde *Monte Carlo*-techniek gebruiken. Dit is in feite een simulatie van het stralingsveld in de wolk. In plaats van alle fotonen te beschrijven, gebruiken we een klein, maar representatief aantal testfotonen die het hele stralingsveld op alle relevante golflengten voorstellen. Deze testfotonen laten we in willekeurige richtingen door de wolk reizen die we verdelen in een groot aantal cellen met ieder een vaste temperatuur, dichtheid, enzovoort. De naam *Monte Carlo* refereert aan het kansproces dat we gebruiken om de werkelijkheid te modeleren. De sterkte van het stralingsveld zoals gerepresenteerd door de testfotonen hangt af van de absorptie en emissie door de moleculen in de gepasseerde cellen, terwijl de excitatie in iedere cel afhangt van de daar aanwezige fotonen. We laten net zo lang fotonen door de wolk reizen totdat de excitatie van de moleculen niet meer verandert, en in evenwicht is met de rest van de wolk. In principe kan met deze techniek de excitatie in een wolk met willekeurig complexe structuur worden opgelost. Praktische problemen zoals beschikbare rekentijd en geheugenruimte van computers beperken de toepasbaarheid enigszins. Voor dit proefschrift hebben we *Monte Carlo*-methoden ontwikkeld die gebruik maken van bol-symmetrische (één-dimensionale) en cylinder-symmetrische (twee-dimensionale) wolk-modellen.

2.3 De warmtestraling van stofdeeltjes

In tegenstelling tot de emissie van moleculen, is de straling die stofdeeltjes uitzenden op (sub-) millimeter golflengten niet verdeeld in nauwe lijnen, maar varieert slechts langzaam met golflengte. Deze zogenaamde continuümstraling is warmtestraling zoals door ieder voorwerp wordt uitgezonden. De intensiteit van deze straling hangt af van de temperatuur van de stofdeeltjes en van de materiaaleigenschappen. Voor interstellaire stofdeeltjes — grafiet- of silicaatkorreltjes met een doorsnede van minder dan een micrometer — zijn voor deze laatste redelijk goed bepaalde waarden beschikbaar in de literatuur.

2.4 Waarneemtechnieken

Moleculaire emissie lijnen op (sub-) millimeter golflengten worden waargenomen met radiotelescopen, die kunnen bestaan uit een enkele schotel (*single-dish*) of uit een *array* of interferometer van meerdere telescopen. Met een *single-dish* instrument kunnen kleinere details worden waargenomen op kortere golflengte, of met een antenne met een grotere diameter. Een *single-dish* telescoop neemt slecht één punt tegelijk waar aan de hemel, maar door een gedeelte van de hemel af te gaan kan de emissie in kaart worden gebracht. Voor dit proefschrift zijn waarnemingen verricht met de James Clerk Maxwell Telescope (15 m diameter) en het Caltech Submillimeter Observatory (10 m) op Hawaii, en met de 30 m antenne van het Institut de Radio Astronomie Millimétrique in Spanje.

Een *array* meet in feite de *structuur* van de helderheidsverdeling aan de hemel. Met behulp van een wiskundige techniek, de Fouriertransformatie, en methoden voor beeldreconstructie, wordt uit de waarnemingen de intensiteitsverdeling aan de hemel afgeleid. Het kleinst waarneembare detail wordt daarbij bepaald door de grootste afstand tussen twee antennes in de *array*. Een *array* simuleert dus als het ware een telescoop met een diameter gelijk aan deze grootste afstand, en men duidt deze techniek dan ook wel aan met de term *apertuur synthese*. De in dit proefschrift verkregen waarnemingen met de Owens Valley Millimeter Array in Californië hebben typisch een resolutie overeenkomstig met 400–1200 AU; in hoofdstuk 5 worden waarnemingen gepresenteerd met een veel hogere resolutie van 70 AU. Een complicerende factor bij deze interferometrische waarnemingen is, dat alleen structuren kunnen worden gemeten die kleiner zijn dan een maximum gegeven door de kortste afstand tussen twee antennes in de *array*. Alle emissie op grotere schalen is onzichtbaar, wat kan oplopen tot meer dan 90% van de totale emissie voor bronnen zoals hier bestudeerd. Door complementaire *single-dish* waarnemingen te verzamelen hebben we een aantal van de problemen omzeild die hierdoor worden veroorzaakt. Overigens bevatten de Owens Valley waarnemingen ook informatie over de continuümstraling van stofdeeltjes, bijvoorbeeld afkomstig uit circumstellaire schijven.

3. Belangrijkste resultaten van dit proefschrift

In dit proefschrift bestuderen we lage-massa stervorming in twee nabijgelegen moleculaire wolken. In het Taurus–Auriga complex, op een afstand van 140 pc (1 parsec = 3.1×10^{16} m = 3.2 lichtjaar), bekijken we een sample van 9 jonge sterren met hun omhulsels van gas en stof, circumstellaire schijven, en bipolaire uitstroom, tezamen kortweg *young stellar objects* (YSOs) genoemd. Op twee na zijn deze objecten omringd door voldoende gas en stof om hen volledig te verduisteren op zichtbare golflengten. Het Taurus–Auriga gebied is het prototype van een wolk met geïsoleerde stervorming.

In de Serpens wolk (400 pc), bestuderen we de vroegste stadia van de vorming van een cluster van lage-massa sterren. We bekijken hier vier YSOs, die omringd zijn door dermate veel gas en stof dat alleen (sub-) millimeter en ver-infrarood straling er in kan doordringen. Deze YSOs zijn waarschijnlijk jonger, en met een massa van 1–2 $M_\odot$ iets massiever dan de ~ 0.5 $M_\odot$ objecten in Taurus.

De waargenomen moleculaire lijnen zijn geselecteerd om alle relevante fysische condities te volgen over schalen tussen $3''$ en $30''$ ($1''$ is een boogseconde: 1/3600 deel van een graad; een lengte van 1 AU op een afstand van 1 pc komt overeen met $1''$, zodat $3''$–$30''$ overeenkomt met 420–4200 AU op 140 pc en 1200–12000 AU op 400 pc). De verschillende overgangen zijn gevoelig voor dichtheden tussen 10^3 en 10^7 deeltjes per cm^3 en temperaturen tussen 10 en 100 K. De waarnemingen van CO, in lijnen van de meest abondante isotoop ^{12}CO, en de schaarsere isotopen ^{13}CO en $C^{18}O$, geven een goede schatting van de totale hoeveelheid gas. Echter, de energieniveau structuur van CO maakt het minder geschikt om de hoge dichtheden in het binnenste van de omhulsels waar te nemen. Een van de vragen die we proberen op te lossen in dit proefschrift is, welke moleculen betrouwbare *tracers* zijn van de omhulsels van YSOs. Een molecule zoals bijvoorbeeld CS (koolstof monosulfide) is gevoelig voor een groot dichtheidsbereik, maar vriest snel vast op stofdeeltjes. Een andere kandidaat is HCO^+. Chemische modellen suggereren dat HCO^+ langer een constante abondantie houdt. Het is ook het meest voorkomende moleculaire ion, en vertelt dus iets over de ionisatie graad, wat relevant is voor stervormingsmodellen waarin magneetvelden een belangrijke rol spelen. Naast HCO^+ en de isotoop $H^{13}CO^+$, hebben we voor de Serpens bronnen ook waarnemingen verzameld in HCN en $H^{13}CN$, en diverse andere moleculen.

3.1 Het Taurus sample

In hoofdstuk 2 wordt onderzocht of *single-dish* waarnemingen van HCO^+ gebruikt kunnen worden om de eigenschappen van de omhulsels rond de Taurus YSOs te bepalen. Allereerst wordt daartoe met behulp van interferometrische waarnemingen de stofstraling afkomstig van de bronnen gescheiden in een bijdrage van het omhulsel en van de circumstellaire schijf. Het blijkt dat 6 van de 9 bronnen omringd zijn door schijven van 0.004–0.07 $M_\odot$, die dus al vroeg in de evolutie gevormd zijn. Deze schijven zijn verantwoordelijk voor ongeveer 30%–75% van de totale continuüm-emissie van de YSOs; de resterende emissie is afkomstig van het omhulsel, met massa's van 0.001–0.26 $M_\odot$. De HCO^+-lijnemissie is sterk geconcentreerd rond de YSOs, behalve in de laagste overgang waarin ook de meer uitgestrekte omringende wolk bijdraagt. De HCO^+ en $H^{13}CO^+$ emissie, en de stofstraling, kunnen beschreven worden met één en hetzelfde model, gebaseerd op theoretische voorspellingen voor een ineenstortende wolk. Vergelijking van HCO^+ en stofemissie van een groep van 24 YSOs in Taurus, waarvan onze 9 bronnen deel uitmaken, laat zien dat *single-dish* waarnemingen van HCO^+ een meer betrouwbare *tracer* zijn van de hoeveelheid materiaal in het omhulsel, en daarmee van de evolutionaire status, dan de totale strofstraling. Dit laatste blijkt namelijk voor 7 van de 24 bronnen volledig afkomstig te zijn van circumstellaire schijven. Dit impliceert dat deze bronnen nauwelijks nog materiaal in een omhulsel hebben, en zich waarschijnlijk in een later evolutionair stadium bevinden.

De structuur van de omhulsels rondom de Taurus bronnen wordt op een kleinere schaal van 700 AU bekeken in hoofdstuk 3, aan de hand van de interferometrische moleculaire-lijnwaarnemingen. Deze laten drie componenten zien van het omhulsel: (1) Het centrale gedeelte van het omhulsel ($\sim$ 1000 AU), dat enigszins afgeplat kan zijn en wellicht roteert. De massa hiervan komt goed overeen met wat in het vorige hoofdstuk werd afgeleid uit de stofstraling. (2) Materiaal in de bipolaire uitstroom dat is versneld tot enkele km s^{-1}, en stationair materiaal langs het uitstroomkanaal dat lijkt te worden verhit of samengedrukt door de uitstroom. (3) Subcondensaties die verspreid liggen door het omhulsel, die ook te zien zijn als donkere en lichte plekken in opnamen van verstrooid nabij-infrarood licht. Deze condensaties kunnen overblijfselen zijn van de oorspronkelijke inhomogene structuur van de wolk, die mogelijk nog zijn gegroeid tijdens de invalfase.

Naast deze kleine-schaal structuur bekijken in we hoofdstuk 3 de relatie tussen de bipolaire uitstroom en het gasomhulsel. Uit CO waarnemingen verkrijgen we een nauwkeurige schatting van de hoeveelheid uitgestoten materiaal en de daarvoor benodigde energie. Deze energie blijkt gecorreleerd te zijn met de helderheid van de bron, de massa van het omhulsel, en met de hoeveelheid stofstraling afkomstig van de circumstellaire schijf. Dit is in overeenstemming met theoretische modellen die veronderstellen dat de uitstroom wordt gedreven door de interactie van de schijf met het stellaire magneetveld: een meer massieve of warmere schijf gaat gepaard met een sterkere uitstroom. De correlatie met de massa van het omhulsel suggereert dat in een meer massief of dicht omhulsel, materiaal in een hoger tempo naar binnen stroomt, resulterend in een hoger accretietempo en een sterkere uitstroom. Dit zou een verklaring kunnen zijn waarom extreem jonge YSOs vaak een zeer sterke uitstroom blijken te drijven.

De accretie van materiaal uit de schijf op de ster genereert een kleine hoeveelheid ultraviolette straling. Dit is onvoldoende om, zoals bij massieve sterren, moleculen te vernietigen. Hoofdstuk 4 laat zien dat deze ultraviolette straling wel een merkbare bijdrage kan leveren aan de verhitting van het moleculaire omhulsel. Het schoongeveegde uitstroomkanaal biedt namelijk een mogelijkheid voor deze straling om ongehinderd tot ver in het omhulsel door te dringen. Uit modelberekeningen die we in dit hoofdstuk uitvoeren aan de hand van de bron TMR 1, blijkt dat dit mechanisme de waargenomen intensiteit kan verklaren van ^{12}CO en ^{13}CO lijnen die bij uitstek gevoelig zijn voor warm gas.

De aanwezigheid van circumstellaire schijven werd in hoofdstuk 2 afgeleid uit ruimtelijk onopgeloste continuüm-emissie zoals waargenomen met de Owens Valley Millimeter Array. De resolutie hiervan bedroeg 400 AU ($3''$), veel groter dan de verwachte diameter van circumstellaire schijven. In hoofdstuk 5 presenteren we continuümwaarnemingen met een resolutie van minder dan één boogseconde ($\sim$ 70 AU) van de jonge dubbelster T Tau. Dit systeem bestaat uit een optisch zichtbare ster, T Tau North, en een begeleider op een geprojecteerde afstand van 100 AU die alleen op infrarode golflengten waarneembaar is, T Tau South. Het infrarode karakter van T Tau S suggereert dat deze ster in een vroeger evolutionair stadium verkeert dan T Tau N, wat moeilijk te verklaren is als men aanneemt dat dit systeem door fragmentatie uit één condensatie ontstaan is. De waarnemingen tonen onopgeloste stofemissie rond de positie van T Tau N. Kennelijk is alleen T Tau N omringd door een schijf, met een massa van 0.14 $M_\odot$, terwijl T Tau S omringd kan zijn door niet meer dan 0.003 $M_\odot$. Zo'n kleine hoeveelheid materiaal moet zich dicht bij de ster bevinden om de verduistering van T Tau S op zichtbare golflengten te verklaren, wat dynamisch geen stabiele configuratie is. Materiaal op grotere afstand is ook geen waarschijnlijke kandidaat om T Tau S te verduisteren, vanwege de onverduisterde gezichtslijn naar T Tau N op slechts 100 AU afstand. De schijf van T Tau N daarentegen bevat voldoende materiaal om T Tau S te verduisteren, als deze laatste ster zich, gezien vanaf de aarde, iets achter de schijf bevindt. Het ogenschijnlijk vroegere evolutionaire stadium van T Tau S is in dit geval uitsluitend te wijten aan de toevallige oriëntatie van het dubbelster-systeem, waarbij de schijf rond de één de andere ster verduisterd.

3.2 Het Serpens sample

Hoofdstuk 6 behandelt interferometrische en *single-dish* waarnemingen van de vier Serpens bronnen. In tegenstelling tot de Taurus bronnen waarbij de compacte stofemissie vooral aan schijven kon worden toegeschreven, lijkt de continuüm-emissie van drie van de vier Serpens bronnen gedomineerd te worden door hun omhulsels. Dit komt overeen met de jonge leeftijd van deze bronnen en de grote hoeveelheid materiaal in de omhulsels. Deze waarnemingen stellen ons in staat de temperatuurs- en dichtheidsverdeling in het omhulsel af te leiden, die zeer goed overeenstemmen met theoretische verwachtingen.

De vierde Serpens bron is niet gedetecteerd in continuümstraling, en is waarschijnlijk een condensatie waarin (nog) geen protoster gevormd is. Net als in het geval van de Taurus bronnen, laat de moleculaire lijnemissie zoals waargenomen met de Owens Valley Millimeter Array het binnenste gedeelte van het omhulsel en heldere emissie langs het uitstroomkanaal zien. De intensiteit van de moleculaire lijnen kan goed gereproduceerd worden met hetzelfde model voor het koude omhulsel als afgeleid uit de stofstraling. De *single-dish* waarnemingen, waaronder ook die van hoger geëxciteerde lijnen, wijzen daarnaast op de aanwezigheid van $\sim 1\%$ warmer materiaal, waarschijnlijk geassocieerd met de uitstroom. De grote hoeveelheid materiaal in de omhulsels, in vergelijking met de Taurus bronnen, maakt de Serpens bronnen uitstekende kandidaten om de structuur van deze ineenstortende condensaties te bestuderen. Een zorgvuldige keuze van moleculaire lijnen en waarneemtechnieken maakt het mogelijk de condities tot diep in deze omhulsels te achterhalen.

3.3 Gedetaileerde modelberekeningen

Zoals in hoofdstukken 2 en 6 al aangetoond, is de vergelijking van moleculaire lijnwaarnemingen met modelberekeningen van excitatie en stralingstransport een belangrijke schakel in de bestudering van YSOs. In hoofdstuk 7 gaan we dieper in op *Monte Carlo*-berekeningen van deze modellen. De toepassing op onze dataset wordt geïllustreerd aan de hand van vier bronnen, variërend in leeftijd van de diep ingebedde Serpens bronnen tot de relatief ver geëvolueerde Taurus bronnen. Als basis dient een simpele formulering van de bol-symmetrische *inside-out collapse*. Dit model blijkt al een zeer goede overeenstemming te geven met de waarnemingen, vooral op schalen van enkele duizenden AU zoals gedetecteerd met *single-dish* instrumenten. De afgeplatte structuur op een schaal van 1000 AU zoals waargenomen in de interferometer-data kan verklaard worden met modellen waarin de oorspronkelijke wolk langzaam roteert of waarin een zwak magneetveld aanwezig is. Voor een meer realistische beschrijving lijken echter modelberekingen nodig van de graduele overgang van een afgeplat omhulsel in een circumstellaire schijf.

Een ander aspect van de waarnemingen is dat van de heldere kleine-schaal emissie langs het uitstroomkanaal. Dit laat waarschijnlijk de interactie zien van de uitstroom met het omringende materiaal, dat we beschrijven met een simpel model voor een zogenaamde *mixing layer*. In deze laag wordt stationair moleculaire materiaal vermengd met, en versneld door, het voornamelijk atomaire materiaal in de uitstroom. Met eenvoudige aannames voor het verloop van de dichtheid, temperatuur, en snelheid in deze laag, wordt inderdaad de heldere emissie rondom het uitstroomkanaal gereproduceerd. Alhoewel dit model nog te eenvoudig is om gedetailleerde conclusies te trekken, lijken de interferometrische waarnemingen van HCO^+ en HCN wel een veelbelovende mogelijkheid te bieden om de dynamica en chemie te onderzoeken van de interactie tussen uitstroom en omhulsel.

4. Conclusies en toekomstig werk

In dit proefschrift bestuderen we het gas en stof in de omhulsels, circumstellaire schijven en bipolaire uitstromen rondom lage-massa protosterren aan de hand van een sample van dertien ingebedde YSOs. Onze resultaten laten zien dat de theoretische modellen voor de ineenstorting van condensaties in interstellaire wolken in grote lijnen overeenstemmen met de waargenomen structuur van de omhulsels. Op de kleinere schaal van de interferometer-waarnemingen lijken rotatie en magneetvelden een belangrijke rol te spelen. De heldere HCO^+ en HCN emissie die in de interferometer-data het uitstroomkanaal omringt, is waarschijnlijk afkomstig uit een *mixing layer* van moleculair materiaal dat door de uitstroom wordt meegesleurd.

De resultaten van dit proefschrift suggereren meerdere mogelijkheden voor nader onderzoek van het proces van stervorming. Met een zorgvuldig samengestelde dataset van *single-dish* waarnemingen kan binnen het raamwerk van de sferisch-symmetrische *inside-out collapse* een statistisch relevant sample van YSOs worden onderzocht. Met de huidige millimeter-interferometers en met toekomstige instrumenten met nog hogere ruimtelijke resolutie kan de fysische en chemische ontwikkeling van de centrale gedeelten van het omhulsel gedurende de hele ingebedde fase gevolgd worden. Dit proefschrift laat zien dat lijnen van schaarse isotopen als $C^{18}O$ en $H^{13}CO^+$ uitstekend geschikt zijn om deze gebieden te bestuderen.

Een belangrijke vraag is, in welke mate de bipolaire uitstroom bijdraagt aan de evolutie van het omhulsel, zowel fysisch door het schoonvegen van een uitstroomkanaal, als chemisch door bijvoorbeeld het opbreken van stofdeeltjes en hun ijsmantels. De heldere emissie afkomstig uit de *mixing layers* rondom het uitstroomkanaal biedt een uitstekende kans om de interactie van de uitstroom met omringend moleculaire materiaal in detail te bestuderen. De modelberekeningen gepresenteerd in hoofdstuk 7 zijn hiertoe slechts een eerste aanzet.

In het afgelopen decennium is grote vooruitgang geboekt in de kennis van de vroegste stadia van stervorming, niet in de laatste plaats door de opkomst van gevoelige *single-dish* telescopen en interferometers in het (sub-) millimeter golflengtebereik. Met de ontwikkeling van instrumenten als de Smithsonian Submillimeter Array, de Millimeter Array/Large Southern Array, en gevoelige spectrografen in het nabij en mid-infrarood op grote telescopen als de Very Large Telescope en de W. M. Keck Telescope, zal een begin gemaakt kunnen worden met het volgen van de fysische en chemische evolutie van de directe voorlopers van planetenstelsels.