

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/22846> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Wang, Kuo-Song

Title: Small scale kinematics of massive star-forming cores

Issue Date: 2013-12-10

Nederlandse samenvatting

Sterren zijn de “atomen” van ons universum. Wat betreft massa worden ze ingedeeld in lichte sterren ($M \sim 0,05\text{--}2 M_{\odot}$), middelzware sterren ($M \sim 2 M_{\odot}\text{--}8 M_{\odot}$) en — het hoofdthema van deze dissertatie — zware sterren ($M \geq 8 M_{\odot}$). De massa van deze laatste klasse overschrijdt per definitie de Chandrasekharlimiet ($\sim 1,4 M_{\odot}$). Die overschrijding heeft als gevolg dat de dood van de ster, die gepaard gaat met een catastrofale ineenstorting van de kern van de ster, resulteert in een neutronenster ($M \sim 8 M_{\odot}\text{--}25 M_{\odot}$) of in een zwart gat ($> 25 M_{\odot}$). Anders dan lichte sterren, die de meest voorkomende klasse vormen, zijn zware sterren naar verhouding zeldzaam. In een sterpopulatie komt de meeste massa voor de rekening van de lichte sterren, terwijl de meeste lichtkracht van de zware sterren afkomstig is. De zeldzame zware sterren zijn er dus toe in staat om de gehele evolutie van het Interstellair Medium (ISM) van sterrenstelsels aan te drijven.

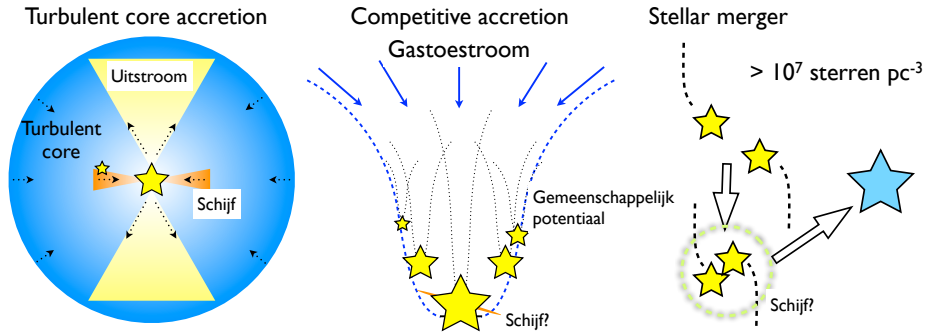
Zware sterren vormen ondanks hun zeldzaamheid de belangrijkste bron voor de synthese van atomen tot aan ijzer (tijdens de hoofdreeksfase van hun leven) en zwaardere elementen (tijdens de supernovafase). Deze verrijking van het ISM is op kosmische tijdschaal een erg kort proces omdat het leven van een ster doorgaans maar enkele miljoenen jaren duurt. In deze korte tijd scheiden de zware sterren grote hoeveelheden materiaal af aan het ISM door middel van intense en omvangrijke uitstroom, dissociatieve UV-straling, krachtige sterrenwind, uitzetting van HII-gebieden en supernova-explosies. Deze vormen een bron van turbulentie in het ISM van sterrenstelsels en men vermoedt dat dit een belangrijk mechanisme is voor de regulering van het ontstaan van sterren en de evolutie van sterrenstelsels.

Vergeleken met onze kennis van de vorming van lichte sterren staat ons begrip van de vorming en vroege evolutie van zware sterren nog in de kinderschoenen. De vorming van lichte sterren vindt plaats in condensaties met hoge dichtheid (omvang: $0,03\text{--}0,2$ pc, dichtheid: $10^{4\text{--}5} \text{ cm}^{-3}$) die zijn ingebed in donkere moleculaire wolken. De temperatuur van een prestellaire kern bereikt vlak voor de algehele ineenstorting een lokaal minimum van ~ 10 K. Op het moment van gravitationele ineenstorting wordt de kern van binnenuit verhit en dit brengt reacties op hoge temperatuur op gang die gepaard gaan met een rijk emissiespectrum van complexe organische moleculen. Dankzij het behoud van

het impulsmoment van de ineenstortende kern ontstaan er circumstellaire schijven in Keplerrotatie. In dit stadium wordt op grote schaal massa overgedragen van de wolk naar de schijf en daarna van de schijf naar de ster. Op hetzelfde moment wordt het overschot aan impulsmoment afgestoten door middel van bipolaire uitstroom. Dit is het stadium waarin het grootste gedeelte van de uiteindelijke ster massa wordt gevormd (tijdsduur van de voornaamste accretie: \sim enkele honderdduizenden jaren). In een later, minder ingebed stadium met weinig massaoverdracht van een eventueel overgebleven omhulsel op de schijf, bevindt de ster zich, omgeven door een protoplanetaire schijf, boven de hoofdreeks en genereert nog altijd een zwakke bipolaire uitstroom. Later houdt de bipolaire uitstroom op en trekt de pre-hoofdreeksster langzaam samen richting de hoofdreeks. De tijdschaal waarop de overgang van een lichte voorhoofdreeksster tot hoofdreeksster zich via samentrekking afspeelt is ongeveer 10 miljoen jaar. De totale tijd die nodig is om een volwassen planetenstelsel, zoals ons Zonnestelsel, te vormen, gerekend van het begin van de samentrekking van de prestellaire kern, is meer dan 10 miljoen jaar. De vorming van een lichte ster duurt ongeveer 0,1% van het totale leven van de ster.

De onduidelijkheden rond de vorming van zware sterren komen voort uit het feit dat ze niet alleen zeldzaam zijn maar ook erg snel evolueren, namelijk in honderdduizend jaar of anders gezegd een paar procent van hun totale levensduur van een paar miljoen jaar, en omdat ze dan nog altijd sterk zijn ingebed. Er is met name geen goed gedefinieerde pre-hoofdreeksfase voor zware sterren. Een duidelijk verschil tussen de vorming van lichte en zware sterren is dat zware sterren intense en dissociatieve UV-straling genereren, wat leidt tot stralingsdruk die voldoende is om accretie te stoppen en HII-gebieden te genereren. Dit is het welbekende “probleem van de stralingsdruk” voor de vorming van zware sterren. Simulaties van massa-instroom in de aanwezigheid van een schijf doen vermoeden dat het stralingsprobleem niet zo groot is, aangezien de schijf in het evenaarsvlak rond de zich vormende zware ster de stellaire straling helpt ombuigen in de richting van de polen waardoor accretie rond de evenaar mogelijk wordt. Dit is het zogeheten “flashlight-effect”. De gaten die worden gecreëerd door bipolaire uitstroom dragen bij aan het flashlight-effect. Straling hoeft niet altijd een destructief effect te hebben, omdat zware sterren kunnen worden gevormd door straling gedreven Rayleigh-Taylor-instabiliteiten. Ook kan het stralingsprobleem worden opgelost door toevoeging van een hoge accretiesnelheid, in de orde van 10^{-3} tot $10^{-4} M_{\odot} \text{ jr}^{-1}$, genoeg om de naar binnen gerichte beweging vast te houden. Merk op dat in het geval van zware sterren die door accretie worden gevormd, de noodzaak van een hoge accretiesnelheid volgt uit de korte levensduur.

Ons begrip van de vorming van zware sterren blijft niet alleen achter vanwege theoretische problemen, maar ook vanwege observationele beperkingen. Gebieden waar de vorming van zware sterren zich voltrekt, bevinden zich door-



Figuur 1: Modellen van de vorming van zware sterren.

gaans op een paar kpc van de zon, zodat men waarnemingen met hoge spatiële resolutie moet uitvoeren. Naast de afstand is er het probleem dat de kernen waarin zware sterren zich vormen sterk zijn ingebed, waardoor slechts de golflengtes van het centimeter-, millimeter-, submillimeter en mid- en ver-infrarooddomein kunnen doordringen. Verder wordt het selecteren van het object bemoeilijkt door de snelle evolutie van de kernen waarin zware sterren zich vormen. Door de mengeling van massa uitstroom en de hoge kolomdichtheden van materiaal waar sterren uit voortkomen is de interpretatie van observationele data niet eenvoudig.

De vorming van zware sterren gaat volgens één van twee zeer verschillende scenario's: accretie of samensmelting. In het laatste model wordt het stralingsprobleem ontweken met directe botsing van stellaire componenten in clusters met hoge dichtheid. Het eerste model kan verder worden opgedeeld in twee verschillende accretiemechanismen: *turbulent core accretion* en *competitive accretion*. Deze drie verschillende concepten van de vorming van zware sterren staan in Fig. 1 schematisch samengevat.

Het model van de turbulent core accretion (ook wel het model van de monolithische ineenstorting) correspondeert met de vorming van geïsoleerde lichte sterren zoals hierboven beschreven, maar met aangepaste turbulentie en accretiesnelheid. De turbulentie is sterk genoeg om fragmentatie van de kern te voorkomen voordat vorming van de zware ster zich verder voltrekt. De hoge accretiesnelheden (10^{-3} tot $10^{-4} M_{\odot} \text{ jr}^{-1}$) kunnen de accretie in gang houden in een omgeving met sterke stralingsdruk. Accretie kan via een schijf verlopen en dat draagt bij aan het ombuigen van de straling in de richting van de polen. De uiteindelijke massa van de ster is gecorreleerd aan de beginmassa van de kern waarin de zware ster zich vormt. Met andere woorden, accretie is een lokaal fenomeen. Het algehele plaatje van de vorming van zware sterren komt overeen met dat van de lichte ster (namelijk, een ineenstortende kern met de vorming van een schijf en uitstroom).

Competitive accretion is gebaseerd op de fysica van de zwaartekracht en de observatie dat zware sterren zich doorgaans vormen in een geclusterde omgeving. De oorspronkelijke wolk waaruit de ster zich vormt (een schaal van pc) valt uiteen tot de thermische Jeans-massa ($\sim 1 M_{\odot}$). In gebieden met een hogere (proto)stellaire dichtheid kan Bondi-Hoyle-accretie verdere *runaway growth* mogelijk maken. Bondi-Hoyle-accretie is het accretieproces dat een sferisch object doormaakt dat door het interstellaire medium beweegt, of de getijdeaccretie veroorzaakt door het gezamenlijke gravitatiepotentiaal van sterrenclusters. De relatief zware sterren (nog niet noodzakelijkerwijs $> 8 M_{\odot}$) die zich aan de onderkant van het gezamenlijke gravitationele potentiaal bevinden hebben de grootste kans om zwaardere sterren te worden ($> 8 M_{\odot}$). Accretie gebeurt globaal op de schaal van wolken tot aan de schaal van kernen (dat wil zeggen, de massa van een bepaalde zware ster kan van elk willekeurig gedeelte van de moederwolk afkomstig zijn en hangt af van de manier waarop het samenklonterende materiaal wordt verdeeld over de zwaarste clusterleden).

Het indrukwekkendste mechanisme van de vorming van zware sterren is samensmelting van lichte protosterren of hoofdreekssterren in het centrum van clusters met hoge dichtheid, namelijk met stellaire dichtheden van meer dan $\sim 10^7 \text{ pc}^{-3}$. Dit samenkloningsscenario is een extreem krachtig proces waarbij circumstellaire schijven worden vernietigd, uitstroom wordt verstoord en mogelijk sterren worden uitgeworpen.

In de drie belangrijkste theorieën over de vorming van zware sterren zijn schijven en uitstroom essentiële onderdelen, maar op verschillende manieren. De structuren hebben volgens het model van de turbulent core accretion een lange levensduur maar in de andere twee modellen zijn ze van korte duur en wordt hun evolutie onderbroken. Het veel voorkomen van omvangrijke bipolaire uitstromen die te zien zijn nabij de kernen waarin zware sterren zich vormen is een sterk teken dat bij de vorming van zware sterren het schijfaccretieproces loopt zoals beschreven door het model van de turbulent core accretion. Het is daarom interessant om de kernen waarin zware sterren zich vormen op kleine schaal (een schaal van $\leq 0,1 \text{ pc}$) te bestuderen met waarneming met hoge spatiële resolutie en in te zoomen op de bewegingen van het gas, zoals turbulentie, samenkloning, uitstroom en met name rotatie. Verder dient gezien de aanwezigheid van schijven de mogelijkheid van planeetvorming rond zware sterren zich aan.

Waarnemingen op de schaal van de millimeter- en de submillimetergolflengtes zijn van belang op het gebied van stervorming. Koud en heet stof kunnen op deze golflengtes worden gedetecteerd door het meten van de warmtestraling. Fysische condities, zoals de temperatuur, de dichtheid, kinematica en de chemische condities, zoals de vraag welke elementen veel voorkomen en hoe ze verdeeld zijn, kunnen worden onderzocht aan de hand van rotatie-overgangen van interstellaire moleculen. Door de komst van faciliteiten om metingen te verrichten met millimeter- en submillimeterinterferometrie zoals de Submillimeter

Array (SMA), de Combined Array for Millimeter Astronomy (CARMA) en de Plateau de Bure Interferometer (PdBI), is het nu mogelijk om de fysische en chemische condities van de kernen waarin zware sterren zich vormen in detail te bestuderen. Interferometrische waarnemingen zijn met name bruikbaar in de jacht naar zware schijven aangezien gebieden van zich vormende zware sterren zich doorgaans op een paar kpc van de zon bevinden en de omvang van de zware schijven slechts een paar 1000 AU of minder is, wat overeenkomt met $\sim 1''$ of minder. In deze dissertatie gebruiken wij zowel waarnemingen met individuele antennes als (sub)millimeter interferometrische waarnemingen om op individuele basis en op verschillende schalen de gaskinematica in de kernen waarin zware sterren zich vormen te bestuderen. Om de informatie over de kinematica uit de waargenomen lijnprofielen te achterhalen gebruiken we een stralingsoverdrachtcode als middel om lijnprofielen te modelleren met samenklontering, rotatie en turbulentie en dit te vergelijken met de waarnemingen.

In hoofdstuk 2 laten wij waarnemingen zien, die gedaan zijn met de James Clerk Maxwell Telescope (JCMT), gericht op 17 kernen waarin zware sterren zich vormen in lijnen $C^{17}O$, $C^{34}S$ en CH_3CN nabij 345 GHz. Het doel is om vast te stellen of deze lijnen, zoals gesuggereerd in de literatuur over interferometrische observaties, inderdaad robuuste tracers van schijven zijn. We vergelijken deze spectrale waarnemingen met generieke stralingsoverdrachtmodellen waaronder samenklontering, rotatie en turbulentie, om een idee te krijgen van de oorsprong van de waargenomen lijnbreedte. We stellen vast dat met $C^{17}O$ 3–2 turbulentie op de schaal van enkele tienduizenden AU het best is na te trekken, terwijl $C^{34}S$ vooral geschikt is voor turbulentie voor de schaal van enkele duizenden AU. CH_3CN 18–17-lijnen zijn de beste tracers voor schijven op de schaal van 1000 AU of minder, in vergelijking met de twee andere transitieën. Gedetailleerdere stralingsoverdrachtmodellering van individuele bronnen is noodzakelijk om de bijdrage van instroom, turbulentie en rotatie te onderscheiden.

In hoofdstuk 3 presenteren wij interferometrische waarnemingen gedaan met de Submillimeter Array (SMA) op 354 GHz gericht op W3 IRS5, een proto-Trapezium. Met de continuüm en lijngegevens op $1''$ – $3''$ -resolutie kunnen we de structuur, kinematica en chemie bestuderen op de schaal van 2000–6000 AU. De continuümwaarnemingen vertonen vijf emissiepieken; twee daarvan zijn zich vormende zware sterren en drie daarvan zijn ofwel sterloze kernen of kernen waarin lichte sterren zich vormen met de potentie om in de toekomst zware sterren te worden. We zien dat de kinematica in de clusteromgeving van W3 IRS5 erg complex is. We stellen op basis van deze dataset voor dat de proto-Trapeziumcluster W3 IRS5 een ideale testcase vormt om onderscheid te kunnen maken tussen modellen van de vorming van zware sterren. Het is ofwel zo dat de accretie van zware sterren lokaal plaatsvindt vanuit de lokale kernen, in welk geval de kleine massa's van de kernen betekenen dat W3 IRS5 in het eindstadium (~ 1000 jr) van instroom en accretie zit; ofwel is het zo dat de accretie

van de sterren nog steeds plaatsvindt vanuit de globale ineenstorting van een zware, clustervormende kern. Er zijn betrouwbare waarnemingen van instroom van grote tot kleine schaal nodig om deze vraag te kunnen beantwoorden.

In hoofdstuk 4 tonen wij de interferometrische observaties met een resolutie van minder dan $1''$, gedaan met de Plateau de Bure Interferometer (PdBI) in de 1,3 mm- en 3 mm-banden gericht op de zich vormende ster van het late O-type AFGL 2591–VLA3. Vanuit een stralingsoverdrachtmodel van de lijnprofielen van HDO en H_2^{18}O stellen wij voor dat er een gelaagde schijfachtige structuur is die een sub-Kepler rotatie en radiële expansie rond AFGL 2591VLA3 ondergaat. De sub-Kepler beweging zou het gevolg kunnen zijn van magnetische afremming in de schijf, terwijl de expansie een reflectie zou kunnen zijn van uitstroom of van een schijfwind. Uit onze waarnemingen valt op te maken dat late O-type sterren gevormd zouden kunnen worden volgens het model van de turbulent core accretion.

In hoofdstuk 5 presenteren wij de interferometrische observaties met een resolutie van een sub-boogseconde, gedaan met de uitgebreide Submillimeter Array (SMA) op 345 GHz in zowel de moleculaire lijnen als het stofcontinuum en gericht op de vroege B-type ster S255IR–SMA1. Het 345-GHz-continuum van SMA1 is voor het eerst opgelost met een resolutie van $\sim 0,3''$ (500 AU). We stellen vast dat de vorming van zware sterren gemarkeerd wordt door de aanwezigheid van de emissie van complexe moleculen in het hete centrum. Bovendien is er een schijfachtige structuur gevonden in de CH_3OH -lijnen waarin duidelijk een snelheidsgradiënt zichtbaar is loodrecht op grootschalige uitstromen. Uit een vergelijking van stralingsoverdrachtmodellen blijkt dat de waargenomen snelheidsgradiënt niet kan worden gekarakteriseerd als een Kepler rotatie bij de verwachte stellaire massa. Lichtkrachtanalyse toont aan dat S255IR–SMA1 een jonge (10^3 – 10^4 jr), zich vormende vroege B-type ster is met een hoge accretiesnelheid ($\sim 10^{-4} M_\odot \text{ jr}^{-1}$). Onze waarnemingen bieden ook bewijs dat in overeenstemming is met het scenario van de turbulent core accretion als model van de vorming van vroege B-type sterren.

Met de belangrijkste conclusies die we hierboven hebben beschreven op zak zullen we onze jacht naar zware schijven voortzetten met behulp van de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). De superieure gevoeligheid en de resolutie op sub-boogseconde schaal maakt ALMA het geschiktste instrument voor dit onderzoek. De jacht naar zware schijven kan met ALMA met een factor 10 tot 100 versneld worden in vergelijking met de huidige (sub)millimeter-interferometers. Gevoelige lijnwaarnemingen zijn essentieel voor gedetailleerde stralingsoverdrachtmodellering. Waarnemingen met grote bandbreedte zijn eveneens zeer geschikt voor het op uniforme wijze selecteren van goede schijftracers. ALMA kan antwoord bieden op de hamvraag van deze dissertatie: hoe worden zware sterren gevormd?