



Universiteit
Leiden

The Netherlands

The infrared spectrum of massive protostars: circumstellar disks and high mass star formation

Barr, A.G.

Citation

Barr, A. G. (2022, April 12). *The infrared spectrum of massive protostars: circumstellar disks and high mass star formation*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3283538>

Version: 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/1887/3283538>

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

Nederlandse Samenvatting

Sterren worden geboren in dichte wolken van gas en stofdeeltjes in het interstellair medium. Met het vormen van sterren ontstaan er ook planetenstelsels. En van alle duizenden planeten die al ontdekt zijn, lijkt de Aarde uniek te zijn. Het is een planeet met de ideale omstandigheden om leven in stand te houden. Goed begrip van het stervormingsproces is van belang om te kunnen beoordelen of de Aarde volledig uniek is, of slechts zeer zeldzaam.

Het vormen van de sterren is een proces dat zich afspeelt over miljoenen jaren. Gedurende een mensenleven kunnen we enkel een momentopname van de evolutie van de geboorte van een ster waarnemen. Door het vergelijken van vele verschillende objecten en door de aanname dat alle sterren op dezelfde manier ontstaan, kunnen we een volgorde van evolutie samenstellen. De wolken waarin de sterren geboren worden hebben een dusdanige hoge dichtheid dat zij onzichtbaar zijn in het optische licht (de golflengtes zichtbaar voor het menselijk oog). Om er toch iets in te kunnen zien moeten we schakelen naar licht met een langere golflengte, vooral infrarood en sub-millimeter (sub-mm). Vandaar dat er gebruik gemaakt is van de telescoopfaciliteiten van het Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) en de Atacama Large Millimetre Array (ALMA). Deze maken het mogelijk om door de stofextinctie van de dichte wolken te kijken. Het verschil tussen optische en infrarood foto's is weergegeven in Figuur 5.25.

Een belangrijk stuk gereedschap van de astronoom is de emissie en absorptie van licht door moleculen. Een bepaald molecuul absorbeert of straalt licht uit op een unieke combinatie van discrete frequenties; deze worden lijnen genoemd. Op deze manier hebben moleculen hun eigen moleculaire vingerafdruk (zie Figuur 1.6 van deze thesis). Door gebruik te maken van een spectrale resolutie die hoog genoeg is, kunnen we al deze emissie en absorptie functies scheiden, en zo informatie afleiden zoals temperatuur, snelheid en chemische aanwezigheid. De chemische aanwezigheid maakt het mogelijk om vast te stellen hoeveel van een bepaald molecuul aanwezig is in verhouding tot een ander molecuul. Zo kunnen we informatie verkrijgen over het chemische proces dat heeft geleid tot de waargenomen aanwezigheden. De meest voorkomende moleculen in stervormende gebieden bestaan uit waterstof, koolstof, zuurstof en stikstof. Voor deze thesis zijn de volgende moleculen relevant: koolmonoxide (CO), koolmonosulfide (CS), water (H₂O), waterstofcyanide (HCN), acetyleen (C₂H₂) en ammoniak (NH₃).

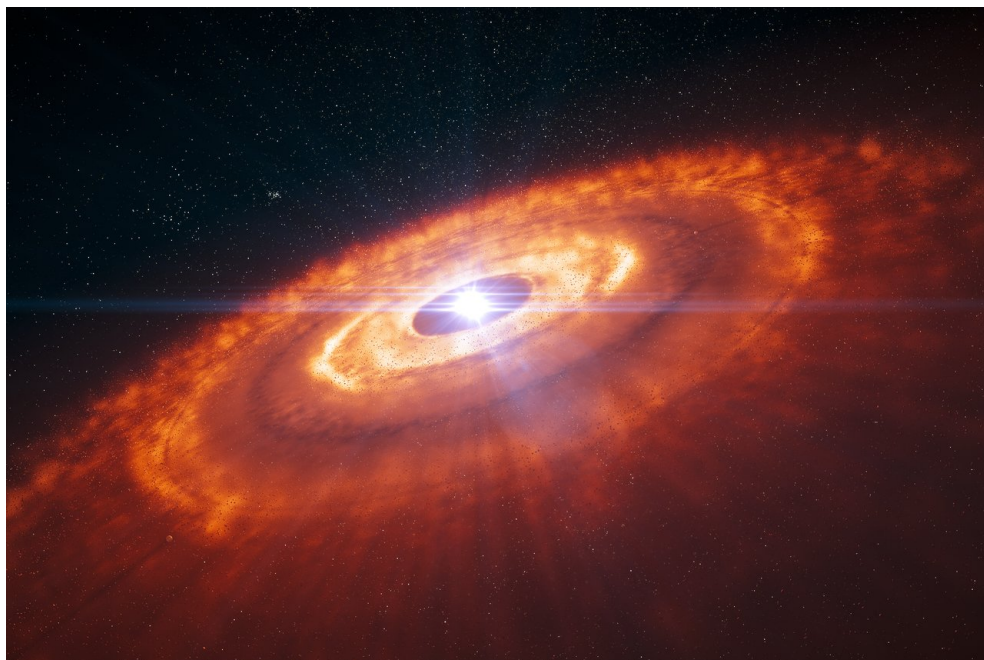
Op basis van hun massa kunnen sterren in twee groepen verdeeld worden: sterren met lage massa (minder dan $8 M_{\odot}$) en sterren met hoge massa (meer dan $8 M_{\odot}$).



Figuur 5.25: De Taurus moleculaire wolken gezien op twee verschillende golflengtes. De foto links is gemaakt in het zichtbare gedeelte van het spectrum, de foto rechts laat dezelfde wolk zien op een golflengte van één millimeter. De wolk ziet er donker uit, maar op de langere golflengtes kunnen we zien dat er veel meer gaande is. Sterren in de maak kunnen herkend worden aan de heldere stippen in de rechterafbeelding. Bron: ESO/APEX (MPIfR/ESO/OSO)/A. Hacar et al./Digitized Sky Survey 2. Acknowledgment: Davide De Martin.

Deze twee groepen hebben vergelijkbare formatieroutes, maar er zijn belangrijke verschillen. Bijvoorbeeld dat er bij grote sterren geen planeten vlakbij zijn waargenomen, waarschijnlijk door de extreme omgeving van deze sterren. Op de kosmische schaal zijn grote sterren logischerwijs belangrijker dan sterren met weinig massa. Deze beïnvloeden het opwarmen en afkoelen van sterrenstelsels, stimuleren de productie van nieuwe sterren, en zijn de voornaamste producenten van veel van de elementen die zwaarder zijn dan koolstof.

Een belangrijk stadium in het vormingsproces van een ster van weinig massa is de schijffase. Hier kan materiaal zich hechten aan een protoster via een schijf die de ster omringt. Zo neemt de massa toe en groeit de ster. De schijf is een gevolg van het behouden van het impulsmoment, waarbij ronddraaiend en ineenstortend materiaal zich uitspreidt in een afgeplatte structuur rondom de ster, zoals afgebeeld in Figuur 5.26. Ook ontstaan er sterke wegvloeiende stromingen en winden die loodrecht op de schijf staan doordat materiaal uit het sterschijf-systeem gestuurd wordt. Zo wordt de wolk die de ster omgeeft verstrooid. Het is nog steeds een punt van debat of de schijven net zo belangrijk zijn in het vormingsproces van de sterren met hoge massa als ze zijn voor de sterren met lage massa. De theorie veronderstelt dat de schijven nodig zijn voor het maken van grote sterren, omdat er een soort mechanisme moet zijn waardoor het materiaal de grote middelpuntvliedende druk kan omzeilen zodat de ster kan blijven groeien. Een schijf is de logische oplossing, maar schijven bij sterren van hoge massa worden zeer zelden waargenomen, wat nog meer het geval is voor de nog grotere sterren.



Figuur 5.26: Artist impression van een circumstellaire schijf rondom een ster in vorming. Bron: ESO/L. Calçada

Deze thesis

Door gebruik te maken van unieke observaties heeft deze thesis de vorming van grote sterren bediscussieerd, waarbij de focus ligt op de details op kleine schaal. De resultaten van het eerste spectrale onderzoek op het $3-13\ \mu\text{m}$ gebied van twee grote protosterren, AFGL 2591 en AFGL 2136, zijn gepresenteerd. De data werd verkregen van observaties van het Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) en van de Infrared Telescope Facility (IRTF) en Gemini telescopen. Onze resultaten gaan over de productie van belangrijke organische moleculen in de schijven van grote sterren, alsook over de temperatuurstructuur van de schijf.

Hoofdstuk 2 heeft het verschil in fysische condities tussen grote en kleine schalen op de plekken van stervorming laten zien, met observaties van het CS-molecuul in AFGL 2591. Pre-ALMA-observaties op submillimeter golflengtes hebben geen onderscheid kunnen maken tussen het schijfgebied en het wolkgebied van de grote protosterren. Absorptiestudies op infrarood golflengtes kunnen echter wel tot op zeer kleine schaal doordringen. Zo is er op infrarood golflengtes veel heter gas met hogere dichtheid geobserveerd dan eerder gevonden was met submillimeter studies. De hoeveelheid zwavel-bevattende moleculen die in de dichte gebieden van het sterrenstelsel geobserveerd zijn, is lager dan verwacht. Onze waargenomen CS-aanwezigheid was erg hoog, wat suggereert dat er een groot reservoir van warme zwavel-bevattende moleculen dicht bij de ster zit. Dit is nog niet eerder waargenomen. Heet gas van 700 K is gezien in CS, wat erop wijst dat dit gas waarschijnlijk geproduceerd is in de chemie

op hoge temperatuur van een schijfatmosfeer.

In hoofdstuk 3 en 4 zijn we verder gegaan met de belangrijkere vragen wat betreft de vorming van grote sterren. Hier hebben we een model gepresenteerd om de observatie van absorptielijnen in een circumstellaire schijf te kunnen verklaren. Dit model verklaart een reeks observatie-beperkingen afgeleid van verscheidene moleculen in AFGL 2591 en AFGL 2136: HCN, C₂H₂, CS, CO, NH₃ en H₂O. De formatie van zulke lijnen vereist een temperatuurgradiënt die toeneemt richting het binnenste gedeelte van de schijf. Vervolgens vereist een dergelijke temperatuurgradiënt dat het verwarmen van de schijf voornamelijk komt door viskeuze processen in het binnenste gedeelte, en niet zo zeer verwarming door stellaire straling. Deze processen leiden tot een aangroei van materiaal op de ster, waardoor de ster groter kan groeien. Enkele observatie-beperkingen zijn van belang om te vermelden, omdat deze belangrijke aandachtspunten van het model aanstippen. De aanwezigheid van HCN en C₂H₂ varieert met de golflengte, wat erop wijst dat deze soorten zich concentreren naar de binnenste 200 AU van de schijf. Vibratoireel-aangeslagen-toestand-banden van CO en C₂H₂ geven resultaten die dichtheden $> 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ vereisen. De aanwezigheden van alle moleculen zijn consistent met wat er verwacht werd op basis van chemische schijfmodellen. Tot slot, de H₂O absorptielijnen zijn verzadigd, maar gaan niet naar een flux van nul, wat normaal het geval is. Dit gedrag is een directe voorspelling van ons schijfmodel.

In hoofdstuk 5 werd het 3 μm spectrum van een reeks grote protosterren behandeld. We vonden op deze golflengte dat MonR2 IRS 3 HCN-lijnen in de straling vertoonde. Het gas was heet met een temperatuur van 500 K. Deze straling kwam overeen met óf een uitdijend omhulsel van gas, óf met de atmosfeer van een circumstellaire schijf. HCN en C₂H₂ lijnen werden gedetecteerd in absorptie in de buurt van AFGL 2136. De resultaten voor deze moleculen, samen met hoofdstuk 3 en 4, vormen een goede onderbouwing van het schijfmodel. Een alternatief voor het schijfmodel is dat het gas dichtbij de ster ligt, maar niet in een schijf. Om een dergelijk model te kunnen laten werken moet H₂O gas verder uitgerekt worden dan HCN en C₂H₂ gas. Dit bleek echter zeer onwaarschijnlijk te zijn, omdat H₂O eenvoudiger geproduceerd wordt. Het schijfmodel was daarom het voorkeursmodel omdat het beter past met al de waargenomen beperkingen.

Hoe nu verder

De detectie van honderden lijnen in het infrarood heeft groot potentieel voor het identificeren en bestuderen van schijven in grote protosterren. Om dit onderzoeksveld verder te ontdekken is het van groot belang om meer objecten op eenzelfde manier te bestuderen. Nieuwe, grotere, en betere telescopen die binnenkort beschikbaar zullen zijn, zijn de James Webb Space Telescope (JWST) en de Extremely Large Telescope (ELT). Deze thesis is van groot belang om richting te geven aan studies met de JWST, die geen observaties van hoge spectrale resolutie kunnen maken. JWST zal wel de gelegenheid bieden om objecten van lage massa te bestuderen op infrarood golflengtes vanwege de hoge kracht. Op die manier zullen we kunnen bepalen of absorptielijnen normaal zijn voor protosterren van lage massa in de vroegste fases van de vorming.

Ook is de ontwikkeling van theoretische modellen van groot belang. Op dit mo-

ment bestaan er geen modellen die circumstellaire schijven die van binnenuit verwarmd worden behandelen. Dit zal essentieel zijn voor een beter begrip en een realistischer beeld van de in deze thesis besproken schijven. Dergelijke modellen zullen ook de chemie moeten meenemen, omdat verschillende fysische processen nodig kunnen zijn om de vorming van moleculen te beginnen.

