

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/28845> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Karska, Agata

Title: Feedback from deeply embedded low- and high-mass protostars. Surveying hot molecular gas with Herschel

Issue Date: 2014-09-24

Nederlandse samenvatting

De terugkoppeling van protosterren op hun omgeving. Een onderzoek naar heet moleculair gas met *Herschel*

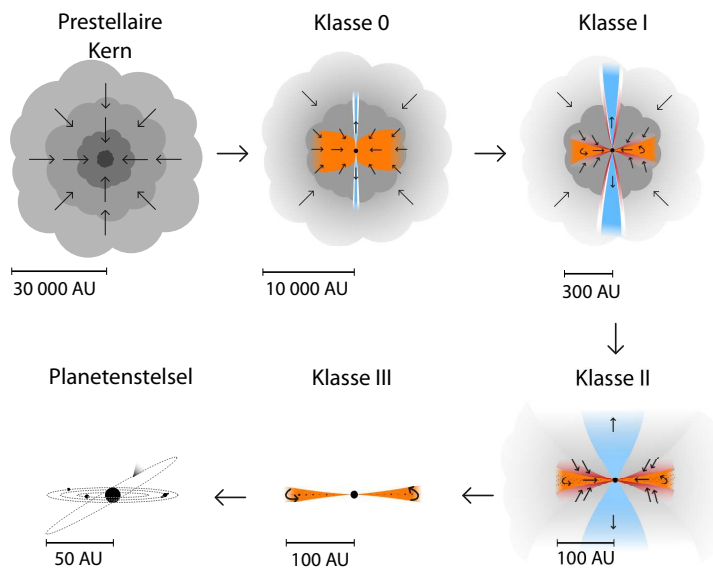
Stervorming

Het ontstaan van ons eigen zonnestelsel kan worden bestudeerd door waarnemingen te doen naar vormende protosterren in ons sterrenstelsel. Voor een beter begrip van ons eigen bestaan volgen we met name de evolutie van protosterren die uiteindelijk op onze zon zullen lijken (i.e. sterren met een massa $M \sim 0.08\text{--}1.5 M_{\odot}$, met M_{\odot} de massa van de zon $\sim 2 \times 10^{33}$ gram). Sterren met een lage massa (zoals de zon) domineren stervorming, zowel qua totale massa als qua aantal. De weinige sterren met een hoge massa ($M \gtrsim 8 M_{\odot}$) hebben echter een groot effect op de vorming van de lichtere sterren, doordat ze sterke straling en winden veroorzaken, en daarnaast zware elementen in het interstellair medium (ISM) injecteren.

Figuur 1 illustreert de belangrijkste fasen in het ontstaan van een lichte ster. Wanneer een dichte kern ineenstort onder zijn eigen zwaartekracht, leidt dat tot de vorming van een jonge stellaire kern die materie aan blijft trekken van het omhullende gas. Een deel van de materie wordt verdreven door bipolaire straalstromen die eerst gecollimeerd zijn (Klasse 0) maar later wijder worden (Klasse I). De ultraviolette (UV) straling van de groeiende ster dringt steeds dieper door in het omhullende gas. Tegelijkertijd is er minder materie dat door de straalstroom kan worden weggeblazen, omdat er minder materie door de ster wordt aangetrokken. Dit proces gaat door totdat de straalstroom helemaal verdwijnt. Wanneer het omhullende gas weg is (Klasse II), wordt de jonge hoofdreeksster met circumstellair schijf zichtbaar. Het stof in de schijf klontert samen tot steeds grotere deeltjes, die uiteindelijk planetesimalen en planeten vormen (Klasse III). Het gas van de schijf komt deels terecht in grote gasplaneten, en wordt deels weggeblazen door de wind en de straling van de ster.

Doel van dit project

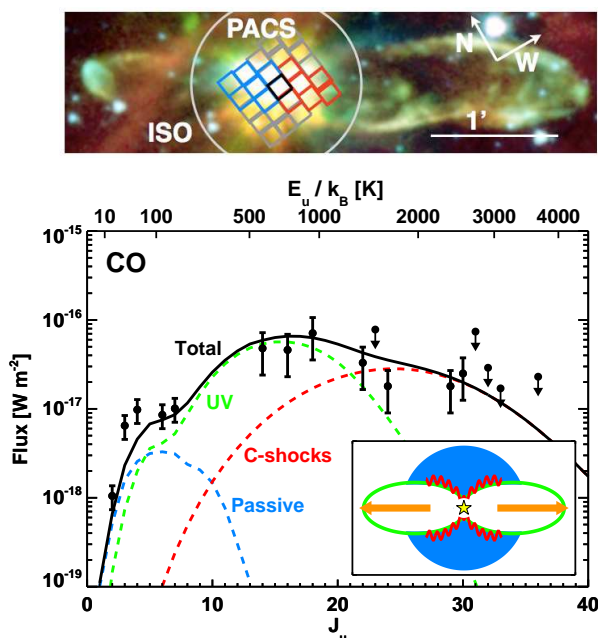
Uit het hierboven beschreven scenario blijkt dat protosterren een destructief effect hebben op de moleculaire wolken waaruit ze geboren worden. Terwijl de protoster groeit, verwarmt ze het ineenstortende omhullende gas, en stoot tegelijkertijd materie uit dat in de donkere wolk terecht komt. De ultraviolette straling kan deels ontsnappen door de



Figuur 5.5 – Schematische weergave van een protoster die uiteindelijk een ster wordt zoals onze zon. De schaal wordt aangegeven voor elke evolutionaire stap, waarbij 1 Astronomical Unit (AU) de afstand is tussen aarde en zon, $1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$. Overgenomen uit Persson (2013).

gaten die de straalstroom gemaakt heeft, en deels het gas verwarmen en de moleculen vernietigen. Het karakteriseren van deze processen is een belangrijke stap in het begrijpen waarom stervorming zo'n inefficiënt proces is, en welke materialen aanwezig zijn voor planeetvorming.

In dit proefschrift wordt geanalyseerd wat voor 'stempel' deze fysische processen achterlaten op het gas. Dit wordt gedaan met infrarood spectroscopie van het allernieuwste state-of-the art *Photodetector Array Camera and Spectrometer* (PACS) instrument aan boord van de *Herschel Space Observatory*. PACS is een uniek instrument dat deze hoog-energetische processen kan waarnemen met een ongeëvenaarde gevoeligheid en spatiële resolutie, en daardoor de omgeving van de protoster kan bekijken die in optisch licht niet zichtbaar is. In het bijzonder kunnen watermoleculen waargenomen worden met PACS, iets wat niet mogelijk is vanaf de aarde. Juist deze watermoleculen kunnen een unieke karakterisatie geven van warm gas en de energetische processen die plaatsvinden tijdens stervorming. Ook spelen ze een actieve rol in de koeling van het gas. Door de ver-infrarode emissielijnen te interpreteren kunnen we bepalen onder welke condities de protosterren vormen, maar er ook achter komen welke rol schokken en UV-straling spelen in dit proces.



Figuur 5.6 – Boven: Moleculaire straalstroom van de Klasse I protoster HH 46. Het waargenomen gezichtsveld door *Herschel* / PACS en zijn voorganger ISO / LWS is aangegeven. De gekleurde blokjes zijn pixels van de PACS detector, waarbij rood de straalstroom detecteert die van ons weg beweegt, en blauw waar die naar ons toe beweegt. Onder: De helderheid van de CO lijnen waargenomen met *Herschel*/PACS en de APEX telescoop ($J_u < 10$), samen met voorspellingen van modellen van het gasomhulsel (blauw), de uitholling die de straalstroom gemaakt heeft in het gas verhit door ultraviolet fotonen (groen), en schokken op kleine schaal in de uitholling (rood). De zwarte lijn is de som van de drie. Een tekening van de verschillende componenten is rechts onder in de ingevoegde figuur gegeven. Overgenomen uit van Kempen et al. (2010b).

Herschel / PACS

Het eerste instrument dat het volledige ver-infrarode spectrum van een protoster heeft waar genomen is de Long-Wavelength-Spectrometer (LWS) aan boord van de *Infrared Space Observatory* (ISO). De telescoop had een vrij kleine diameter van 0.6 meter, waarmee groottes van $\gtrsim 20,000$ AU ($1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ is de gemiddelde afstand tussen de aarde en de zon) bestudeerd kunnen worden in nabije protosterren. Daardoor vielen zowel het omhullende gas als de straalstroom op 1 enkele pixel (zie figuur 2), en was niet duidelijk waar het licht, dat was waargenomen met LWS, vandaan kwam.

Herschel / PACS, operationeel tussen halverwege 2009 en halverwege 2013, verbeterde de spatiële resolutie met een factor 8, en kon daardoor het uitgestraalde licht van $\sim 2,000$ AU rond nabije protosterren onderscheiden van de rest van het gezichtsveld (zie Figuur 2 voor een vergelijking tussen ISO en PACS). Door de combinatie van de reso-

lutie met de verbeterde gevoeligheid van PACS en astrochemische modellen, kunnen we de herkomst van de ver-infrarode straling bepalen, en daarmee de fysische processen die plaatsvinden tijdens de eerste fasen van de stervorming.

Figuur 2 is een voorbeeld van zo'n analyse, waarbij het opwarmen van omhullend gas, UV fotonen van de protoster, en schokken de koolmonoxide (CO) emissie van een Klasse I protoster verklaren. De modellen die voor deze analyse gebruikt worden geven echter geen unieke verklaring: de CO emissie kan ook gemodelleerd worden met een combinatie van schokken. Er moeten dus beperkingen aan het model toegevoegd worden door tegelijkertijd licht van alle atomen en moleculen te analyseren die in het ver-infrarood stralen – zoals water damp (H_2O), hydroxide (OH) en atomair zuurstof (O). Om erachter te komen welke fysische processen de vorming van protosterren domineren, moet onderzoek gedaan worden naar protosterren in verschillende fasen van hun ontwikkeling, met verschillende massa's en in verschillende omgevingen.

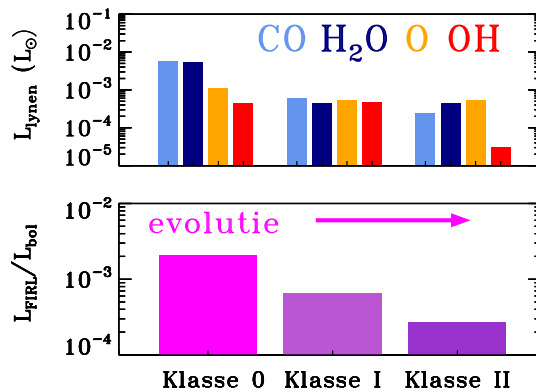
Dit proefschrift

Dit proefschrift behandelt de herkomst en evolutie van Klasse 0/I protosterren met een lage en hoge massa met ver-infrarode straling. Dit is gedaan met behulp van *Herschel* / PACS. Ver-infrarode straling is alomtegenwoordig in stervormingsgebieden (Hoofdstuk 2-5). In 80% van de lage massa protosterren worden CO, H_2O en OH lijnen waargenomen. 40% van deze objecten is ook zichtbaar in lijnen van hoog geëxciteerde toestanden van CO en H_2O (Hoofdstuk 5). Het stralingsgebied heeft een grootte van ~ 1000 AU, hoewel een aantal objecten straling over $\sim 10,000$ AU vertoont in de richting van de CO straalstroom. Emissie van atomair zuurstof komt ook meestal op deze grote schalen voor.

Van lage massa protosterren nemen we CO excitatie waar met excitatietemperaturen van ~ 320 K en ~ 690 K (Hoofdstuk 2, 5). Wanneer protosterren met een grote verscheidenheid in massa wordt bestudeerd, blijkt dat ze allemaal gas van ~ 300 K bevatten (Hoofdstuk 3). Ondanks de gelijkenissen in de CO emissie tussen protosterren met kleine en grote massa, is er een groot verschil tussen beide: het omhullende gas van een zware ster draagt 10 keer zoveel bij aan de totale emissie, dan het omhullende gas van een lichte ster (Hoofdstuk 3).

De verhouding tussen koeling door moleculen en koeling door atomen hangt sterker af van de leeftijd van de protoster dan van zijn massa. Daar staat tegenover dat de verhouding tussen koeling van het gas en de helderheid van de protoster maar een factor 4 kleiner wordt bij de overgang van Klasse 0 naar Klasse I (zie Figuur 3), terwijl het meer dan een factor 20 verschilt tussen protosterren met een lage en hoge massa (Hoofdstuk 2,3).

Schokken zijn de belangrijkste bron van heet ($T \gtrsim 300$ K) en dicht ($n \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$) gas in de lage massa protosterren (Hoofdstuk 2, 4, 5). Niet-dissociatieve schokken produceren het overgrote deel van de waargenomen moleculaire lijnen, maar dissociatieve schokken zijn nodig om zowel de O en OH lijnen te verklaren, als ook de hoge excitatie van CO en H_2O (Hoofdstuk 4, 5). De huidige modellen van schokken zijn nog niet geheel correct. In een volgende generatie modellen zou UV straling, dat tijdens de schok ontstaat, ook geïmplementeerd moeten worden (Hoofdstuk 4, 5). Het gaat om UV velden van 10-100



Figuur 5.7 – Boven: Gaskoeling in de lijnen van koolmonoxide (CO), water (H₂O), hydroxide (OH), en atomair zuurstof (O) voor Klasse 0, I en II protosterren. Onder: Evolutie in de hoeveelheid koeling in alle ver-infrarood lijnen ten opzichte van de helderheid van de bron.

keer het gemiddelde interstellaire stralingsveld (Hoofdstuk 5).

De toekomst

Het German Receiver for Astronomy at Terahertz-Frequencies (GREAT) instrument aan boord van de Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) kan spectra meten in het ver-infrarood met hoge spectrale resolutie, die een aanvulling zijn op de *Herschel* / PACS waarnemingen. In het komende jaar zijn waarnemingen van atomair zuurstof mogelijk, met ongeëvenaarde spectrale resolutie van 1 km s^{-1} , waarmee we kunnen bepalen hoeveel de straalstroom en het UV bijdragen aan de atomaire emissie tijdens de evolutie van de protoster.

Met sub-millimeter waarnemingen met de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) zullen we nog meer inzicht krijgen in de effecten van jonge stellaire objecten op hun omgeving. De emissie van CO isotopologen op een schaal van $\sim 100 \text{ AU}$ zal de rol van UV straling duidelijk maken, terwijl SiO waarnemingen de sterkste schokken karakteriseren die ontstaan door interactie van de straalstroom met het omhullende gas en stof.

De spectrale kaarten met een resolutie van $0.4\text{-}0.8''$ van het Mid-Infrared Instrument (MIRI) op de James Webb Space Telescope (geplande lancering eind 2018), maken het mogelijk om het gas rondom protosterren te bestuderen in het mid-infrarood ($5\text{-}28 \mu\text{m}$) op dezelfde ruimtelijke schaal als ALMA.

Hoewel de *Herschel* niet langer operationeel is, bevat het archief nog veel waarnemingen die niet geanalyseerd zijn. In het bijzonder de waarnemingen van nabije protosterren in moleculaire wolken, zullen bijdragen aan modellen van stervorming, evolutie, en het effect op de omgeving.

