



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Warm and cold gas in low-mass protostars : Herschel Space Observatory and ground-based surveys

Yildiz, U

Citation

Yildiz, U. (2013, May 1). *Warm and cold gas in low-mass protostars : Herschel Space Observatory and ground-based surveys*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/20855>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/20855>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/20855> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Yildiz, Umut

Title: Warm and cold gas in low-mass protostars : Herschel Space Observatory and ground-based surveys

Issue Date: 2013-05-01

Nederlandse samenvatting

Gas rond lage-massa stervorming

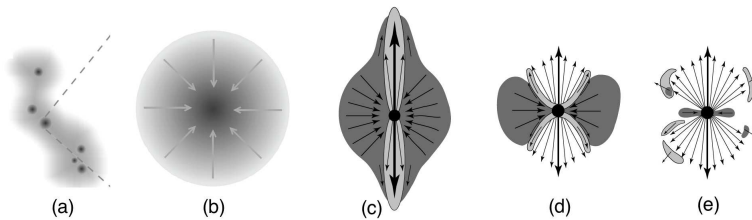
Waarnemingen met het Herschel Ruimte Observatorium en vanaf de aarde

Abstract

Gas- en stofdeeltjes in de omgeving van pas gevormde protosterren absorberen de straling van deze bronnen. De zogenaamde *jonge stellaire objecten* (YSO's, ~ 1 Zonsmassa) zijn hierdoor onmogelijk met optische of infrarood telescopen waar te nemen. Deze koude objecten kunnen echter dankzij de recente ontwikkelingen in de technologie toch waargenomen worden via lange golflengten zoals de millimeter (mm) en submillimeter (submm) golflengten. Waarnemingen op basis van moleculaire spectroscopie bij mm golflengten stelt ons in staat de moleculen te lokaliseren en hun abundanties te meten. Het is bovendien ook mogelijk om zowel de kinematische gegevens van de omliggende omhulsels als de protostellaire straalstromen te detecteren. Koolstofmonoxide (CO) staat bekend als het tweede meest abundante molecuul in het interstellaire medium (ISM) na moleculair waterstof (H_2). Met zijn simpele niveau structuur en de verschillende isotopologen (^{13}CO , $C^{18}O$, $C^{17}O$) is het met mm/submm telescopen dankzij de rotationele overgangen van CO mogelijk om relatief eenvoudig veel informatie te vergaren over deze objecten. Waar met H_2 gebieden met hoge kinetische temperaturen van een paar honderd tot een paar duizend graden Kelvin, zoals geschokt gas, waar te nemen zijn, kunnen we met CO de door protostellaire straalstromen opgeveegde gassen detecteren met een temperatuur van rond de 100 K. Mm en submm moleculaire spectroscopische waarnemingen zijn één van de belangrijkste instrumenten om koude en donkere gebieden in het heelal te observeren.

Inleiding tot stervorming

Het interstellaire medium bestaat bij benadering uit 99% gas en 1% stof in massaverhouding. Ruwweg 90% van dit gas (in deeltjes aantal) is in de vorm van waterstof (H



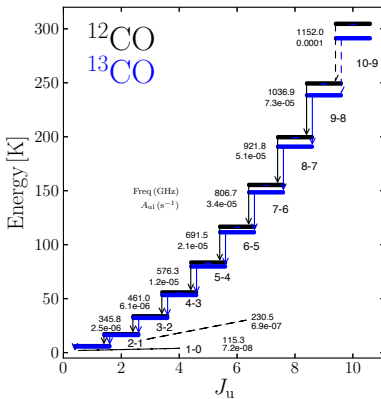
Figuur 1 – (a) Donkere moleculaire wolken. (b) Dichte kernen in moleculaire wolken beginnen ineen te storten om sterren te vormen. (c) Fase 0; de eerste van de vier stervormingsfases. Er zijn krachtige jets aanwezig. (d) Fase 1; de jets verliezen hun kracht en een accretieschijf is aan het vormen. (e) Fase 2; de jets zijn nu geheel verdwenen evenals de omhulsels en een protoplanetaire schijf is ontstaan.

of H_2), 8% is in de vorm van helium (He) en 1 á 2% bestaat uit zwaardere elementen zoals zuurstof (O), koolstof (C) en stikstof (N). Twee krachten in het heelal spelen een belangrijke rol in de geboorte en de dood van de hemelse objecten. Dit is ten eerste de zwaartekracht, die de neiging heeft om al het materiaal samen te persen en ten tweede de (thermische) druk, die ernaar streeft om al het interstellair materiaal in de tegengestelde richting uit elkaar te drijven. Aan het begin van stervorming moet de zwaartekracht de thermische druk overwinnen opdat een gaswolk ineen kan storten. Zodra dit proces begint, zal al het materiaal naar het centrum beginnen te vloeien. Volgens de ideale gaswet kunnen we begrijpen dat dit met name gebeurt in de koudste plekken van de gaswolk. De enige gebieden die in het interstellair medium dicht genoeg zijn voor de zwaartekracht om de relatief zwakke thermische druk (door de lage temperatuur) te overwinnen en dus het stervormingsproces te starten, zijn de donkere moleculaire wolken.

De simpelste vormen van dit soort gaswolken zijn bolwolken (ook bekend als Bok globules). De temperaturen van bolwolken zijn circa 10 K, met een dichtheidsbereik van 10^3 - 10^4 cm^{-3} is hun massa typisch tussen de 10 en 100 Zonsmassa's. Terwijl bolwolken typische afmetingen hebben van een paar parsec, kunnen donkere wolken en wolk complexen aanzienlijk groter zijn met afmetingen van tientallen parsecs. Deze gebieden zijn de ideale locaties voor lage-massa stervorming.

Lage-massa stervorming

Lage-massa sterren worden gedefinieerd als sterren met een massa van minder dan 2 Zonsmassa's en een bolometrische helderheid minder dan $100 L_{\odot}$. In Fig. 1 wordt de sequentie van lage-massa stervorming samengevat. Het koelere gas condenseert in sommige regio's tot de vorming van de iets dichtere gebieden (Fig. 1a). Gas en stofdeeltjes beginnen in de gecondenseerde gebieden ineen te storten onder de invloed van eigen zwaartekracht (Fig. 1b). De wolk van stof en gas vormt het omhulsel van waaruit accretie op de protosterren plaatsvindt. In dit stadium is de massa van het omringende omhulsel hoger dan de massa van de centrale protoster. De ineenstortende protoster zorgt voor een bipolaire mo-



Figuur 2 – Rotatie-energie overgang diagram van koolstofmonoxide; ^{12}CO (zwart) en ^{13}CO (blauw). De stippellijnen geven de waargenomen overgangen met *Herschel*-HIFI. De frequentiewaarden aan de linkerkant zijn gegeven in GHz eenheden en de Einstein A coëfficiënten in s^{-1} . Zie Figuur 1.4 voor kleur versie.

leculaire straalstroom om het impulsmoment af te voeren en helpt zodoende het accretie proces (fase 0; Fig. 1c). Na verloop van tijd schakelt de straalstroom uit, maar de toevoer van materie zet door om een accretieschijf te vormen. In deze fase is de massa van het omringende omhulsel lager dan van de centrale protoster (fase 1; Fig. 1d). In de latere fasen schakelt de straalstroom helemaal uit en de resterende materie in het omringende omhulsel wordt ofwel geaccreteerd door de protoster of het vormt een circumstellaire schijf om planeten te vormen (fase 2; Fig. 1e). Deze classificatie wordt doorgaans bepaald door het meten van de spectrale energie distributie (SED) of door berekeningen van de bolometrische helderheid. Hoezeer de fasen ook op een dergelijke manier te onderscheiden zijn, er zijn nog veel vragen over het stervormingsproces.

Millimeter en submillimeter waarnemingen

Het principe achter de thermische camera is het omzetten van infrarood of submm straling in beeld. Deze straling wordt uitgezonden door verwarmde bronnen, zoals het warme stof rond jonge protosterren. Om dergelijke straling waar te kunnen nemen, moet de telescoop kouder zijn dan de bron zelf. De reden waarom moleculaire wolken donker zijn, is dat de aanwezige 1% stof zeer efficiënt is om bijna al het passerende licht te blokkeren ook al bestaat de moleculaire wolk uit 99% gas. Deze stofdeeltjes bestaan uit silicaten (zand) of grafiet (koolstofverbinding) die kleiner zijn dan 1 micrometer. Terwijl optische telescopen alleen kunnen constateren dat er een donkere wolk is, zijn submillimeter telescopen goed in staat om de thermische straling van dergelijke stoffige gebieden te observeren.

Moleculen zijn belangrijk voor de structuur van het ISM en ze spelen een belangrijke rol in de vorming van sterren en planeten door als koelmiddel voor het gas te fungeren. Door het observeren van moleculen krijgen we informatie over de fysische en chemische omstandigheden van hun verleden, heden en toekomst. Deze moleculen worden waarge-

nomen door hun discrete energie, waarbij de overgang tussen twee niveaus straling emitteert of absorbeert die overeenkomt met een frequentie/golflengte die telescopen kunnen detecteren. Deze straling is uniek en is een soort vingerafdruk voor elk type molecuul.

Er zijn drie soorten overgangen die waargenomen kunnen worden. (i) Elektronische overgangen; dit zijn de overgangen tussen de elektronische kwantumtoestanden in atomen of moleculen, wat leidt tot emissie of absorptie van straling in het zichtbare en het ultraviolette (UV) deel van het spectrum. (ii) Vibratoire overgangen; deze zijn te wijten aan de vibratoire toestanden binnen elke elektronische toestand en treden op als gevolg van de oscillerende beweging van de kernen. Gassen met temperaturen rond de ~ 1000 K zenden straling uit bij infrarood golflengten. (iii) Rotatoire overgangen; deze ontstaan door abrupte veranderingen in het impulsmoment van het molecuul en het koppel uitgeoefend op de moleculaire dipool. Gassen met temperaturen van < 300 K zenden voornamelijk bij millimeter en submillimeter golflengten uit. In dit proefschrift worden de rotatoire overgangen van de CO en O₂-moleculen gebruikt om de fysica en chemie van de protostellaire omgevingen te karakteriseren.

De CO-molecuul is het tweede meest voorkomende molecuul in het interstellair medium na H₂. Het heeft een zeer eenvoudig niveau structuur (afb. 2) en verschillende observeerbare isotopologen (¹³CO, C¹⁸O, C¹⁷O). CO-moleculen zijn detecteerbaar bij mm/submm golflengten. De spectraallijnen traceren het dichte moleculaire gas in het omhulsel, dat de kinematische kenmerken van ineenstorting laat zien, en het hoge snelheid gas in de protostellaire straalstromen. Één van de belangrijkste toepassingen van de CO-molecuul is om het opgeveegde gas door de protostellaire straalstromen te karakteriseren waar de temperatuur over het algemeen relatief laag is (rond honderd graden Kelvin). CO-kaarten worden daarom veel gebruikt om de fysische eigenschappen van deze straalstromen te identificeren. C¹⁸O lijnen worden voornamelijk gebruikt om de sluimerende gas omhulsels te onderzoeken, terwijl ¹³CO een goede tracer blijkt te zijn voor het gas dat verhit is door UV straling (afb. 3).

In dit proefschrift zijn waarnemingen van verschillende grond- en ruimtetelescopen gebruikt om protostellaire omgevingen te bestuderen. De waarnemingen in de ruimte zijn gecentreerd rondom de Herschel Space Observatory, terwijl de grondwaarnemingen verricht zijn met de Atacama Pathfinder Experiment (APEX), de James Clerk Maxwell telescoop (JCMT), de IRAM 30m telescoop, en de Onsala 20m radiotelescoop.

De *Herschel* Space Observatory is een hoeksteenmissie van European Space Agency (ESA) die erop gericht is om het heelal bij ver-infrarood en submillimeter golflengten te bestuderen. De telescoop heeft een Cassegrain ontwerp met een primaire spiegel van 3.5 meter diameter. Dit is de grootste spiegel die ooit gebouwd en gelanceerd is naar de ruimte voor astronomische doeleinden. De drie wetenschappelijke instrumenten (HIFI, PACS en SPIRE), die de verschillende golflengten bestrijken, bevinden zich in het cryo-vacuüm van de helium container. In dit proefschrift wordt voornamelijk het HIFI-instrument gebruikt. HIFI (heterodyne instrument voor het ver-infrarood) is een zeer hoge resolutie heterodyne spectrometer die gevoelig is voor de frequenties in het bereik 480–1250 GHz en 1410–1910 GHz (157 tot 625 micrometer). Het is gebouwd door een consortium van

instituten onder leiding van SRON, Stichting Ruimte Onderzoek Nederland.

Het Atacama Pathfinder Experiment (APEX) is een 12 meter submillimeter telescoop op een hoogte van 5100 meter op Llano de Chajnantor in Chili. Het heeft verschillende instrumenten die werken bij frequenties vanaf ~ 200 GHz tot 1 THz. In dit proefschrift hebben we vooral het CHAMP⁺ instrument gebruikt om de hoge- J CO lijnen ($J_{\text{up}} = 6$ tot 8) waar te nemen. De state-of-the-art technologie gecombineerd met de uitstekende atmosferische omstandigheden op locatie maakt het een ideaal instrument om hoogfrequente moleculaire overgangen te observeren.

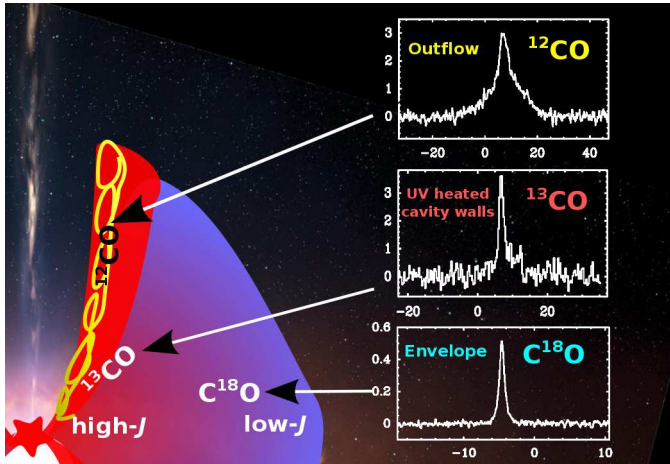
De James Clerk Maxwell telescoop (JCMT) is een 15 meter submillimeter telescoop op een hoogte van 4092 meter op Mauna Kea, Hawaii. De twee instrumenten, de HARP-B 16-pixel ontvanger bij 345 GHz en de 1-pixel ontvanger A, zijn in dit proefschrift vooral gebruikt om de lage- J CO lijnen (bijv. 3–2 en 2–1) waar te nemen.

Zoals te zien is in Fig. 3 hebben lage-massa jonge stellaire objecten verschillende waarneembare componenten tijdens hun vorming. Het complex bestaat uit een bipolaire moleculaire straalstroom, zeer krachtige en sterk gebundelde stralen (jets), de centrale protoster en het omliggende omhulsel. De dichtheidsstructuur en het temperatuurprofiel van het omhulsel wordt gedefinieerd als een machtswet. Dit komt doordat bij een ineenstorting van een gaswolk zich een verloop ontwikkelt waarbij de dichtheid en temperatuur stijgen van buiten naar binnen. Zeer sterke jets en winden barsten uit vanaf beide polen van de protoster en de binnenste delen van de schijf die het materiaal in het omhulsel wegblazen in de vorm van een gecollimeerde straalstroom. Deze straalstromen zijn belangrijk bij het afvoeren van het impulsmoment en helpen de efficiëntie van het accretie proces. De interactie van de straalstroom met het omringende omhulsel verhit het materiaal welke leidt tot de vorming van vele soorten moleculen.

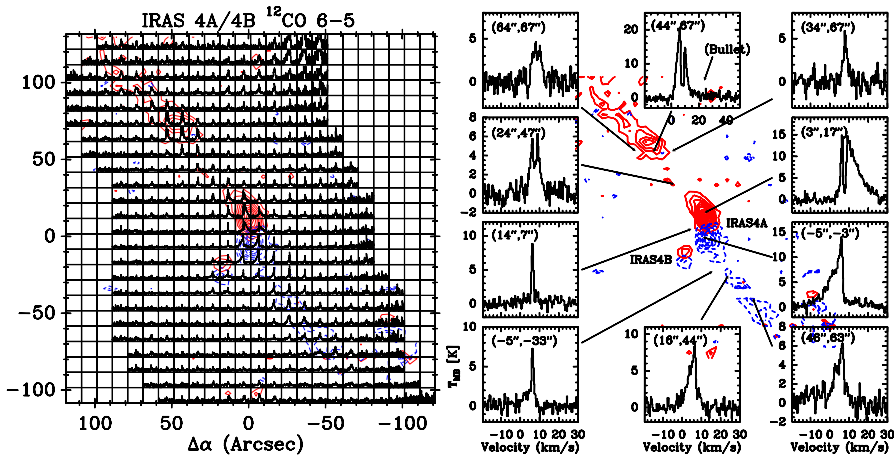
Warm gas

Zoals eerder vermeld wordt CO al jarenlang gezien als één van de beste tracers voor onderzoek naar de fysische structuur van jonge stellaire objecten. Doordat zeer droge locaties voor telescopen in het verleden niet beschikbaar waren en de technologie maar beperkte mogelijkheden bood, was het alleen maar mogelijk om de lagere rotatie-overgangen van CO (koud gas, < 50 K) te onderzoeken. Onlangs is het dankzij de komst van ruimtetelescopen, ontwikkelingen in hoge-technologie ontvangers en uitstekende droge waarnemlocaties mogelijk geworden om hogere- J CO rotatie-overgangen waar te nemen die hogere energieën afbakenen. Dit stelt ons in staat de temperaturen en de kolomdichtheden te kwantificeren door warm (100–150 K) en heet (> 150 K) gas te karakteriseren.

Middels het gebruik van de efficiënte mapping mogelijkheden van het multi-pixel APEX-CHAMP⁺ instrument werden de eerste grootschalige kaarten van jonge stellaire objecten gemaakt bij hoge frequenties (bijv. CO $J = 6-5$ en $7-6$ overgangen). In Fig. 4 wordt de grootschalige kaart van twee nabijgelegen protosterren, NGC1333 IRAS 4A en IRAS 4B,

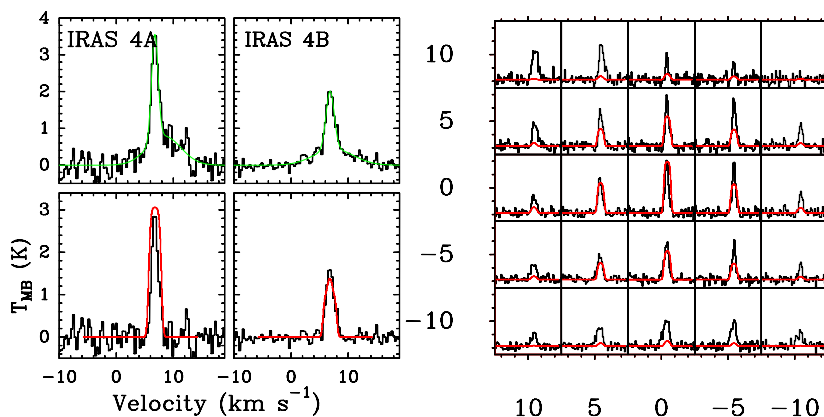


Figuur 3 – Anatomie van een protoster en zijn omgeving. In het centrum is de protoster weergegeven met jet, in paars de omhulsels van gas en stof, in rood de ‘cavity walls’ achter de jets. Zie Figuur 1.5 voor kleur versie.



Figuur 4 – De figuur rechts toont de ^{12}CO 6-5 spectrale kaart van de NGC1333 IRAS 4A en IRAS 4B protosterren genomen met APEX-CHAMP⁺. De figuur links toont de uitvergroete kaarten door in te zoomen op enkele van deze regio's. Zie Figuur 4.1 en 4.3 voor kleur versie.

in de ^{12}CO 6-5 overgang afgebeeld. Op de afbeelding links vertegenwoordigt elk vierkant een regio van $10'' \times 10''$ (2350 AU \times 2350 AU). Het is dan ook duidelijk dat de straalstroom een afstand afgelegd heeft van zo'n 25000 AU (1 AU = afstand Zon-Aarde). Op de afbeelding rechts zijn enkele spectra van de linker afbeelding uitvergroet om de intensiteit van de CO emissie weer te geven samen met de kinematische gegevens. Veel van de spectra kunnen worden ontleed in twee onafhankelijke Gaussische profielen die verschillende fysische mechanismen van de emissie aanduiden. Spectra met lijnbreedtes



Figuur 5 – Aan de linkerkant zijn de ^{13}CO 6–5 centrum spectra van de protosterren IRAS 4A en IRAS 4B afgebeeld. De bovenpanelen tonen met de groene lijn een fit over de spectrum die is samengesteld uit twee Gaussische functies. In de onderpanelen is met de rode lijn te zien dat de modellen met de stralingstransport code van de sluimerende gas omhulsels overeenkomen met de waarnemingen. Aan de rechterkant zijn de spectra van de naaste omgeving van IRAS 4A met daaroverheen in rood de model spectra ter vergelijking weergegeven. Zie Figuur 4.18 en 4.19 voor kleur versie.

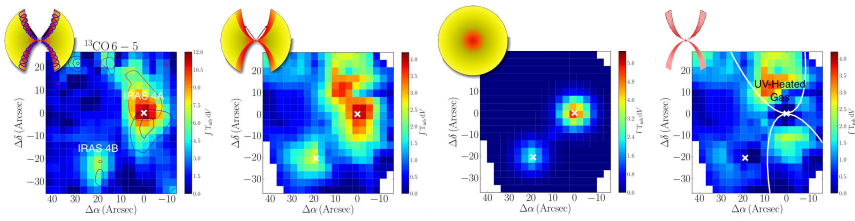
van enkele km/s duiden op straling van het gas in het sluimerende omhulsel. Daarentegen geeft een spectrum met een lijnbreedte van 15–25 km/s aan dat de emissie afkomstig moet zijn uit het hoge snelheid straalstroom gas.

De geïntegreerde intensiteit van de blauw en roodverschoven delen van de spectra worden afzonderlijk berekend om de grootte, locatie en richting van de straalstroom te vinden. In tegenstelling tot de IRAS 4A protoster die een sterk gecollimeerde straalstroom heeft, toont IRAS 4B een veel kleinere straalstroom en duidt dus op een bijna face-on inclinatie. Kortom, hoog frequente CO rotatie-overgangen zijn zeer nuttig voor het karakteriseren van het warme gas dat geassocieerd is met jonge stellaire objecten.

Belang van UV straling

Met de hoge- J overgangen van CO die we verkregen hebben met de hoge resolutie data, zijn we in staat om te bepalen waar elke type gas zich bevindt. Tegelijkertijd hebben we met behulp van de $J=(6-5)$ overgang van de CO isotoop ^{13}CO de centrale regionen en omgevingen van de protosterren gedetecteerd met APEX. Wat vertelt deze lijn ons over de fysische processen?

In de bovenpanelen van Fig. 5 tonen we de spectra op de exacte positie van de protosterren IRAS 4A en IRAS 4B. Over de spectra heen zijn de fits met twee Gaussische functies in het groen weergegeven. Van deze spectra zijn de Gaussische fits met een wijde lijnbreedte



Figuur 6 – Waargenomen ^{13}CO 6–5 spectraallijn-kaarten van de NGC1333 IRAS 4A en de IRAS 4B protosterren. (a) de waargenomen straling (b) het sluimerende gas na verwijdering van jets (c) de gemodelleerde gas omhulsels (d) bewijs van UV verwarmde ‘cavity walls’. Zie Figuur 6 voor kleur versie.

die de outflows vertegenwoordigen afgetrokken (zie de zwarte lijnen in de onderpanelen van Fig. 5a). Het resterende nauwe lijn spectrum is afkomstig van de wanden van de holte die de jets en outflows in het omhulsel hebben gemaakt, de *cavity walls*. In hetzelfde onderzoek hebben we middels de veel minder abundante C^{18}O lijnen ($^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}=540$ vs $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}=65$) de sluimerende gas omhulsels gemodelleerd. Voor deze modellen zijn de C^{18}O $J=(1-0)$ tot en met de met Herschel geobserveerde $J=(9-8)$ en $J=(10-9)$ lijnen gebruikt en is met de stralingstransport code RATRAN de hoeveelheid van het sluimerende gas en de abundantie van CO gemodelleerd.

In de onderpanelen van Fig. 5a worden in het rood de modelresultaten van het waargenomen gas in het omhulsel getoond. Met behulp van hetzelfde model, zie Fig. 5b, is het omhulsel in de directe omgeving van de protoster IRAS 4A te zien. Hieruit blijkt dat de intensiteit van de lijnen rond de protoster hoger ligt dan die van de modellen, m.a.w., er is nog een fysisch proces aanwezig dat tot nu toe niet is meegenomen in de modellen. We postuleren dat dit het gas is dat verwarmd wordt door UV straling in de wanden van de holte. Dit warme gas in de ‘cavity walls’ kan kwantitatief zichtbaar worden gemaakt door de volgende stappen toe te passen: (a) directe waarnemingen van de ^{13}CO 6–5 spectraallijnen van het gebied, (b) de brede Gaussische fit van de spectra af te trekken, (c) de bijdrage van het omhulsel te bepalen door het C^{18}O model toe te passen op ^{13}CO met het stralingstransport model RATRAN, en (d) deze modellen van de resterende straling af te trekken. Het blijkt dat er zich rond de wanden van de holtes die door de straalstromen zijn gevormd zich een grote hoeveelheid warm gas bevindt. Zoveel zelfs dat wanneer de massa van het gas aan de wanden berekend wordt, het blijkt dat deze bijna evenveel is als de massa van het opgeveegde gas door de straalstromen. Aan de hand van deze waarnemingen hebben we de eerste directe bewijzen geleverd van het door UV straling verwarmde gas in de ‘cavity walls’.

Conclusie

In dit proefschrift hebben we dankzij de technologische ontwikkelingen antwoorden kunnen geven op een aantal vragen, maar stervorming blijft nog steeds een onvolledig opge-

lost probleem. Door de technische verbeteringen in het mm/submm regime die nodig zijn om het binnenste van koude, donkere moleculaire wolken door te dringen en de productie van arrays van telescopen (interferometers zoals ALMA), zullen de huidige vragen ongetwijfeld op zijn tijd weer plaats maken voor nieuwere vragen. In deze studie hebben we geprofiteerd van de hoogfrequente CO waarnemingen die we met de Herschel ruimtetelescoop en de op een hoogte van 5100 meter bevindende hoge resolutie mapping APEX telescoop verkregen hebben. Door middel van ^{12}CO waarnemingen waren we in staat de locatie en de intensiteit van outflows te identificeren. We hebben met onze ^{13}CO waarnemingen de eerste directe bewijzen geleverd van door UV straling verwarmde ‘cavity walls’ van het gas gelegen rond de jets en via C^{18}O de abundantie van CO in het omhulsel bepaald.

