

University of Groningen

Far and mid-infrared studies of star forming regions

Koumpia, Evgenia

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2016

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Koumpia, E. (2016). *Far and mid-infrared studies of star forming regions: Probing their thermal balance, chemistry and evolution*. Rijksuniversiteit Groningen.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Samenvatting

De focus van dit proefschrift ligt op het doorgronden van de fysische en chemische processen die plaatsvinden in gebieden waar zowel zware als lichte sterren gevormd worden, in het bijzonder de vroege evolutionaire stadia van stervorming. De fysische en chemische processen tijdens de stervorming beïnvloeden het thermisch evenwicht en de chemische samenstelling van het interstellair medium, alsmede de evolutie ervan. Stervormingsgebieden, die zich bevinden in dichte delen van het interstellaire medium, behoren chemisch gezien tot de meest rijke en complexe gebieden van het heelal. Het achterhalen van hun moleculaire samenstelling is één van de voornaamste doelen van de astrochemie in het algemeen, en van dit proefschrift in het bijzonder. Maar waarom zijn wij zo geïnteresseerd in de chemische samenstelling van deze gebieden?

We weten dat diverse processen de chemische samenstelling, complexiteit en evolutie van het interstellaire medium beïnvloeden tijdens de vorming van sterren. Bovendien hebben samenstelling en evolutie van het interstellaire medium op hun beurt weer invloed op de evolutie en mogelijk ook de massa van de pasgeboren ster. De dynamische processen die leiden tot het ineenstorten van een interstellaire gaswolk, en daarmee de vorming van een protoster, zijn zowel door de thermische druk in het gas als magnetische velden (die beide weerstand bieden tegen de zwaartekracht en daardoor de ineenstorting belemmeren) diep verweven met de chemische samenstelling van het gas. Met name het thermisch evenwicht (Hoofdstukken 2 en 3) kan alleen begrepen worden als we weten welke moleculen gevormd kunnen worden, wanneer en waar ze gevormd worden, hoeveel ze bijdragen aan de koeling van het gas door spectrale emissie, en wat de voornaamste warmtebronnen zijn gedurende de stervorming. Aan de andere kant zijn magnetische velden via ionen ook gekoppeld aan het medium. De kennis van de ionisatiestructuur en abundantie van ionen zijn daardoor essentieel voor het begrip van de stervormingsprocessen.

Een aanverwant interessegebied is de studie van de evolutionaire stadia van zeer jonge objecten (Hoofdstuk 4). De processen die een pre-stellaire kern uiteindelijk omvormen tot een protoster, en enkele evolutionaire stadia daarna, kunnen onderzocht worden aan de hand van moleculaire lijn-emissie en de continuüm-emissie van stof. Moleculaire emissielijnen vormen krachtig gereedschap voor het ontrafelen van diverse mechanismes die een rol spelen tijdens de stervorming, aangezien verschillende molecuulsoorten indicatoren zijn voor verschillende condities (denk aan temperatuur, dichtheid en snelheidsverdelingen). Een belangrijke vraag hierin is: welke observationele signaturen kunnen

gebruikt worden om de verschillende evolutionaire stadia te onderscheiden?

Ten slotte is inzicht in de vorming en dissociatie van moleculen tijdens de ster-
vorming (Hoofdstuk 5) direct gekoppeld aan het begrip van de chemische historie van
sterren- en planetenstelsels. Complexe organische moleculen, bouwstenen van leven,
zijn waargenomen in de omgeving van jonge protosterren. Hoe, waar en in welke om-
standigheden zijn deze gevormd? Studie van chemische reacties en evolutie in stervorm-
ingsgebieden zou moeten leiden tot kennis van hun verdeling in protoplanetaire syste-
men, en kunnen het begrip van het ontstaan van prebiotische moleculen, en mogelijk
leven, naderbij brengen.

De specifieke vragen die in dit proefschrift aan de orde komen zijn:

- Hoe ziet het thermisch evenwicht, en de chemische en dynamische structuur in
foton-gedomineerde gebieden eruit, en wat is de invloed van ultraviolette straling
en dichtheidsvariaties (“klontering”) in dergelijke omgevingen? (Hoofdstukken 2
en 3)
- Hoe kunnen we randvoorwaarden stellen aan de evolutionaire toestand van kernen
met hoge dichtheid? (Hoofdstuk 4)
- Wat is de fysische en chemische structuur van de omhulsels van Zon-achtige pro-
tosterren? Hoe vergelijken deze zich met die van zware protosterren? (Hoofdstuk
5)
- Hoe beïnvloeden uitstromende gassen de chemie van de protostellaire omgeving?
(Hoofdstuk 5)

Om deze vragen te kunnen beantwoorden heb ik gebruikt gemaakt van waarnem-
ingsgegevens van zowel lijn- als continuümstraling in het millimeter en sub-millimeter
golflengtebereik. De data zijn afkomstig van verschillende instrumenten, van enkelvoudige
telescopie (bv. JCMT, IRAM-30m) en interferometers (CARMA) op aarde, vanuit de
stratosfeer (SOFIA) en de ruimte (Herschel Space Observatory). Om deze observaties te
interpreteren heb ik een verscheidenheid aan modellen voor stralings-transport gebruikt
(o.a. RADEX, RATRAN).

Twee gebieden aan de hemel staan centraal in dit proefschrift, het foton-gedomineer-
de gebied S140, dat in verband gebracht wordt met de formatie van zware sterren, en
NGC1333 IRAS4, waar een cluster van lichte protosterren bezig is zich te vormen. De
specifieke wetenschappelijke vragen, de gebruikte methodes en de voornaamste resul-
taten worden hieronder besproken.

• **Het thermisch evenwicht van stof en gas in foton-gedomineerde gebieden**

Het S140-gebied is bij uitstek geschikt voor de bestudering van het thermisch even-
wicht in foton-gedomineerde gebieden (PDR's). Voor de studie naar de thermische kop-
peling tussen stof en gas (Hoofdstuk 2) en het thermisch evenwicht in dit gebied heb

ik gebruik gemaakt van een serie gegevens waarin zowel de continuüm-emissie van stof (PACS, SOFIA/FORCAST, SOFIA/GREAT, SCUBA) als moleculaire spectraallijnen (IRAM-30m, HIFI) vertegenwoordigd zijn. De lijnemissie van CO heb ik gemodelleerd met behulp van twee programma's voor de berekening van stralings-transport: RADEX (van der Tak et al. 2007a) en RATRAN (Hogerheijde & van der Tak 2000), om een bovengrens te kunnen stellen aan de kinetische temperatuur, de gasdichtheid en de kolomdichtheid van CO en de verdeling hiervan over het gebied. Voor de studie van het thermisch evenwicht is het bovendien belangrijk de energietoevoer te bepalen (Hoofdstuk 3). We hebben de resultaten van de emissie door gas en stof (DUSTY; Ivezić et al. 1997), de resultaten met betrekking tot het koelings-budget (fijnstructuurlijnen van [OI]-63 μm en [CII]-158 μm) en de modellering van de PDR samengevoegd.

Onze voornaamste resultaten in het S140 gebied zijn a) het gas is systematisch 5–15 K warmer dan het stof, ondanks de hoge dichtheid van het gas (Hoofdstuk 2), en wij concluderen dat dit een gevolg is van de diepe penetratie van ultraviolette straling vanuit bronnen ingebed in een medium dat “klonterig” is en/of blootstaat aan zijwaartse schokken; en b) de verhoudingen tussen lijn- en continuümintensiteiten van de CII en OI lijnen in het ver-infrarood, die indicators zijn binnen het koelings-budget, zijn lager ($< 10^{-4}$) dan in alle andere galactische bronnen, en komen overeen met het ver-infrarood lijn-deficiet dat geobserveerd wordt in ultralumineuze infraroodsterrenstelsels (ULIRGs; Malhotra et al. 1997; Muñoz & Oh 2015). Een ander opmerkelijk, en op het moment onbegrepen, feit is dat de voornaamste emissie van fijnstructuurlijnen in S140 spatieel verschoven is ten opzichte van de voornaamste warmtebron (Hoofdstuk 3).

Wanneer continuüm- en moleculaire lijn-observaties geanalyseerd worden met behulp van geavanceerde stralings-transport modellen, zouden de mogelijke verschillen tussen de temperaturen van gas en stof meebeschouwd moeten worden. Gegeven het feit dat het waargenomen ver-infrarood deficiet in ULIRG's nog niet geheel begrepen is, lijkt S140 een bruikbaar voorbeeldsysteem te zijn dat tot betere modellen en dus een beter begrip kan leiden.

• De vroegste fasen in de vorming van lichte sterren

De fase van protostellaire evolutie, volgend op de vorming van de protoster, is tegenwoordig redelijk goed gekarakteriseerd. Van de voorafgaande evolutie van een prestellaire kern tot een protoster, daarentegen, is niet veel bekend. Wel is voorgesteld dat de vorming van een eerste hydrostatische kern (FHSC) een cruciale stap is. Eén van de bronnen die ik voor mijn proefschrift bestudeerd heb, NGC1333 IRAS 4, is een gebied waar lichte sterren gevormd worden, en dat drie zeer jonge stellaire objecten bevat, IRAS 4A, IRAS 4B en IRAS 4C. Hiervan is IRAS 4C potentieel een zeer jong object dat we direct met de nabijgelegen Classe 0 objecten IRAS 4A en IRAS 4B kunnen vergelijken.

Om de evolutionaire toestand van deze objecten te onderzoeken (**hoofdstuk 4**), heb ik gebruik gemaakt van een moleculaire lijnsurvey (JCMT 330-373 GHz -Kaarten) en continuüm waarnemingen (CARMA). Ik heb gebruik gemaakt van een set van observationele indicatoren anders dan de bolometrische temperatuur die op grote schaal gebruikt wordt

en ik heb de uitstoot gemodelleerd met behulp van RADEX. Ik vond verschillen tussen de drie bronnen in vier aspecten: a) de kinetische temperatuur bepaald vanuit de H₂CO lijnen is veel lager richting IRAS 4C dan de andere twee bronnen, b) de lijnprofielen van de gedetecteerde soorten vertonen sterke uitstroomactiviteit ten opzichte van IRAS 4A en IRAS 4B maar niet voor IRAS 4C, c) de HCN/HNC ratio is lager dan 1 richting IRAS 4C, wat de koude aard van de bron bevestigt, en d) de mate van CO bevrozing en deuteratie zijn het laagst in de richting van de warmste bron, IRAS 4B.

Op basis van deze bevindingen lijkt IRAS 4C zich in een andere evolutionaire toestand te bevinden dan IRAS 4A en IRAS 4B, maar onze resultaten zijn niet geheel consistent met een jonger of een ouder object. De belangrijkste bevindingen zijn de afwezigheid van uitstroom activiteit en de koude aard van IRAS 4C. Deze zouden kunnen wijzen op een eerste hydrostatische kern (FHSC). Een meer gedetailleerd fysisch model van IRAS 4C is één van mijn plannen voor toekomstig onderzoek. Deze methode kan worden uitgebreid tot een grotere steekproef van FHSC kandidaten (Enoch et al. 2010; Chen et al. 2010; Pineda et al. 2011; Pezzuto et al. 2012; Schnee et al. 2012). Ik ben vooral geïnteresseerd in de vergelijking van de resultaten van een dergelijke steekproef met een steekproef van objecten met zeer lage lichtkracht ($< 0,1 L_{\odot}$; VeLLOs). Een dergelijk onderzoek kan leiden tot het begrip van het verband tussen een prestellaire kern en een protoster, volgens theorie de eerste hydrostatische kern.

Het aantal waargenomen FHSC kandidaten in Perseus (6) is een orde van grootte hoger dan voorspeld. Dit zou een lagere groeisnelheid ($< 4 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{jr}$) kunnen impliceren dan voorspeld door modellen (Evans et al. 2009).

Hoofdstuk 5 richt zich op de chemie van jonge ingebedde protosterren. Klassieke hete kernen, geassocieerd met zware stervorming, worden gekenmerkt door hoge temperaturen en hoge dichtheden en zijn interessant vanwege de complexe organische moleculen die zij bevatten. Er is een complexe organische chemie gevonden in de binnenste omhulsels van lichte jonge protosterren, de zogenaamde hot corinos (eg. Ceccarelli 2008).

Om de chemische structuur van lichte protostellaire omhulsels te bestuderen, te vergelijken met zware varianten en de uistroom van dergelijke omgevingen te onderzoeken, gebruik ik JCMT en HIFI data en vergelijk ik mijn RATRAN empirische modellen met tijdsafhankelijke chemische modellen (ALCHEMIC; Semenov et al. 2010). De chemische modellen die worden gebruikt omvatten zowel gasfase, gas-stof interactie, en oppervlakte reacties. De modellen voorspellen de abundantie profielen als functie van straal van de fysische modellen (~ 5000 AU) voor het tijdschema tussen de 10^3 - 10^6 jaar van de betreffende soort (bijv. CO, HCO⁺, CH₃OH), die men direct kan vergelijken met de empirische abundanties verkregen mbv. RATRAN met hetzelfde fysische model. We zien dat de empirische abundantie profielen voor de meeste moleculen overeenkomen met de gemodelleerde chemische abundanties voor het buitenste omhulsel en we zien dat zij systematisch 1-2 orden van grootte lager zijn dan in een prototypisch zwaar protostellair omhulsel (AFGL 2591; Kaźmierczak-Barthel et al. 2015). Wij schrijven de

waargenomen verschillen toe aan de hogere temperaturen rond de hete kernen en de afwezigheid van de bevroeringszone in vergelijking met de lichte protosterren.

Voor sommige soorten wijken de waargenomen abundanties af van de gemodelleerde abundanties. De waargenomen daling van de sneeuwgrens van CO is slechts ~ 2 ordes van grootte, in vergelijking met ~ 6 ordes van grootte die de chemische modellen voorspellen. De sterke uitstroom activiteit en de winden die YSOs produceren, resulteren in hogesnelheidsgas, maar ook in evacuatie van gebieden in de buurt van de protoster. Deze holtes die worden geassocieerd met uitstromingen, zijn eerder waargenomen (bijv. NGC 1333; Lefloch et al. 1998) en de UV-straling speelt waarschijnlijk een cruciale rol in dergelijke omgevingen omdat het kan doordringen tot grotere afstanden. We hebben een uitstroom holte gesimuleerd door de UV-straling te verhogen die aan de waargenomen moleculen wordt blootgesteld. Het waargenomen CO abundantie profiel kan redelijk worden verklaard met $UV=10 \times ISRF$ en $A_V=1$ mag. Dit zou een verklaring kunnen zijn voor de constante empirische CO abundantie in RATRAN, zelfs bij lage temperaturen tot 10 K waarbij CO wordt verwacht te bevriezen op stofdeeltjes en daardoor dus minder abundant zou zijn. Deze benadering verbetert de samenhang tussen de theoretische en waargenomen abundantie profielen. Een meer gedetailleerde 2D/3D chemische modellering die rekening houdt met de schijfstructuur en uitstroom holten is daarom naar verwachting nauwkeuriger en staat gepland voor toekomstig onderzoek. Ten slotte heb ik tijdsafhankelijke chemische modellen gebruikt om de leeftijd van NGC 1333 IRAS 4A te bepalen ($>4 \times >10^4$ jr).

• Vooruitzichten

Voor dit onderzoek heb ik, zoals hierboven beschreven, aan verschillende projecten gewerkt om zo bij te dragen aan het beantwoorden van wetenschappelijke vragen in dit veld. Tijdens dit proces zijn vragen onbeantwoord gebleven en hebben nieuwe vragen zich aangediend.

Een opvallend voorbeeld van een dergelijke nieuwe vraag is: waarom observeren we een ver-infrarood lijn deficit in de richting van S 140 en is deze bron een geschikt prototype om het waargenomen deficit in ULIRGs te begrijpen? Mijn plannen voor de toekomst in het wetenschappelijke veld zijn het modelleren van S 140 met behulp van geavanceerde PDR-codes (bijv. Kosma-tau) en het verkrijgen van (sub)-mm kaartwaarnemingen die alle drie de infraroodbronnen en de ionisatiefront bestrijken, om daarmee de ruimtelijke verdeling van meer soorten te bestuderen. Een voorbeeld van deze observaties zijn hoge-J overgangen van CO met behulp van SOFIA. Daarnaast, kunnen kaarten van multi-lijn overgangen van HCN in de richting van S 140 helpen bij het bepalen van de volumedichtheid n_{H_2} van het gebied. Het lange termijn doel van dit project is om een model te realiseren dat voldoet aan de waargenomen ver-IR lijn deficit in ULIRGs.

Een andere interessante wetenschappelijke richting, is het d.m.v. observaties bepalen van de ontbrekende schakel tussen prestellaire kernen en protosterren, de zogenaamde eerste hydrostatische kern. Een toekomstig project kan worden gericht op een grotere

steekproef van FHSC kandidaten uit de literatuur en deze te observeren met hoge hoekresolutie interferometers zoals bijv. ALMA. De belangrijkste vragen die nog openstaan zijn: Is er een verband tussen objecten met zeer lage lichtkracht ($<0,1 L_{\odot}$; Velloso) en FHSCs? Wat is de deuteratie en de uitstroom activiteit (indien aanwezig) in de richting van FHSC kandidaten? Het voorspelde aantal FHSCs in Perseus is 1 orde van grootte lager dan het waargenomen aantal. Kunnen we een aantal van hen uitsluiten op basis van verkeerde identificatie, of dient de theorie te worden aangepast ten aanzien van de accretie snelheid in de vroege fasen van stervorming? Daarnaast wil ik de fysische structuur van IRAS 4C bepalen met behulp van continuüm observaties en stralingstransport codes zoals DUSTY.

Ten slotte is de ontwikkeling van 2D/3D chemische modellen die een schijfstructuur en uitstroom holtes in de richting van lichte en zware protostellaire objecten omvatten van cruciaal belang om daarmee de, in verschillende bronnen (bijv. NGC 1333 IRAS 4A) waargenomen abundantie profielen beter te kunnen bepalen.

Acknowledgments

A child's dream matured with time and here I am, finishing my Ph.D in astronomy almost 5 years after I moved from Athens to Groningen to live this dream. During these years I had to deal with intellectual challenges -everyone expects those when starting a Ph.D- but also emotional, cultural and even climate challenges -the last is tricky to predict-. During a 5 year period of time many things can happen in ones life that can be a bigger burden if you live abroad. I would not be able to finish my thesis without the support, encouragement, help and friendship of people who I would like to thank here.

My first thanks and sincere gratitude go to my advisor Prof. Dr. Floris van der Tak. Floris, first of all thank you for offering me this position and for giving me the opportunity to accomplish my dream in a great working environment such as SRON/Kapteyn Astronomical Institute. I cannot thank you enough for trusting me and opening the door of an astronomical world full of opportunities, knowledge and great collaborations. I really do appreciate your patience, support, contributions and guidance especially in my difficult times.

I am also really grateful to my co-promotor Peter Barthel. Peter I always admired your positive and friendly attitude. Thank you very much for your support and your comments regarding the introduction of this thesis but also your attempts to boost my motivation when I needed it the most.

I would like to acknowledge all my collaborators. A huge thank you goes to Volker Ossenkopf, Paul Harvey and Dmitry Semenov. Volker I have always appreciated and admired your sharp insightful contributions and your straightness during our communication while working on Chapters 2 and 3 of this thesis. You had a great influence on the quality of those chapters and I feel lucky and honored to have worked with you. Paul thank you for the excellent dust analysis and modeling in chapter 2 and for all your patience. When things were difficult and flat regarding the progress of the first paper you Volker, Paul and Floris were the people that boosted the missing energy to go on. Thank you all for that! Dima thank you so much for our collaboration in the last chapter of the thesis. I really appreciate your fast responses and excellent contributions regarding

the chemical modeling, especially in this part of my Ph.D that everything had to be so fast and efficient. I so much enjoyed our power mode telecons. Additional thanks go to John Tobin, Bhaswati Mookerjea, Asunción Fuente, Carsten Kramer, Rene Plume, Adwin Boogert, Emmanuel Caux and Gary Fuller for all your contributions and suggestions that helped improving the clarity of the scientific chapters presented in this thesis. Sharing your expertise with me was precious! I would like to thank especially Woojin Kwon, my groupmate, collaborator and my CARMA guru for sharing all your experience and knowledge on CARMA with me. You have been providing answers and help whenever I needed it and most importantly always with a friendly smile!

I thank my fellow groupmates, Maja Kazmierczak-Barthel, Zsofia Nagy, Yunhee Choi, Veronica Allen, Kateryna Frantseva, Kuo-Song Wang for the stimulating discussions, for sharing our scientific ideas during our group meetings but also our frustrations, worries and have fun in various occasions. Additional thanks go to the more senior scientists that were part of the sub-mm group meetings in Groningen: Frank Helmich (thank you for your encouragement), Russ Shipman (I really enjoyed all our interactions), Max Avruch (my movies mate :-)) and a truly kind person), Migo Mueller (my first officemate—too much fun :-)), Fred Lahuis, Andrey Baryshev and Rens Waters. Thank you all for the fruitful discussions and your comments while I was practising my upcoming talks and posters. Not only they helped me improving my performance but also helped me seeing my own work from a different perspective. I would also like to acknowledge Prof. dr. Inga Kamp for her insightful comments that helped improving the quality of my thesis.

I also need to acknowledge my precious Microcosmos in Groningen, my friends. This is when I really realise that I have been very lucky with my officemates. Maja thank you for your continuous support, you have been there for me whenever I needed it and you were always ready to listen and give useful advice but also give space when needed. You are a great friend! Katya you had to go along with much of my frustration during these almost 2 years. Thank you a lot for your support and for the pleasant and friendly atmosphere in our office and outside the institute! Veronica, thank you for being there and sharing our worries and view on the world! In the end only with you guys I managed to be Gandalf for 1 night :-). Aleksandar I really enjoyed all our conversations and nice evenings. And it was great you brought Jasmina to the institute during our movie nights. Jasmina, my dear friend I feel lucky to have met you! Jan it was a great luck to meet you only after a couple of months I came to live in Groningen. Because of you I did not have to search for years before finding all these hidden cultural gems of Groningen. Thank you for our conversations and pleasant company. I would also like to thank Bertrand, Enrico, Filippo, Giorgos, Joost, Pratyush, Shoko, Stefano, Stephen and Veronique (my first roommate) for nice times and conversations! Ronald I enjoyed all the interesting conversations we had during happy hours and breaks. Thank you for all your help with Dutch in general and my Dutch summary in particular. In my acknowledgements of friends I could never leave out my own selected family from Greece: Stella, Petros and

Amalia. Our friendship bond was meant to be.

Last but not the least, I would like to thank the two first people I saw when I started my journey on this earth and universe, my lovely parents. Thank you for all your care and love. Thank you for giving me the opportunity to exist in first place and be able to fall in love with the night sky and its mysteries later on. At the end I would like to express my deep appreciation and gratitude to my schatje, Werner who supported me in any possible way and stayed with me even in my darkest hours. I could not make it so far without you! The time and space collided and here we are ... here we are :-)

Evgenia Koumpia
Groningen
June 2016

p.s. Well they are not able to read it or understand it in any sense but I also thank my beloved cats, Kaiser and Miraki, for their every single meow and purring that brings a smile on my face and warmth in my heart -every single time-.

