



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Orion's Dragon and other stories: Feedback by massive stars

Pabst, C.H.M.

Citation

Pabst, C. H. M. (2021, March 18). *Orion's Dragon and other stories: Feedback by massive stars*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3147353>

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/1887/3147353>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/3147353> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Pabst, C.H.M.

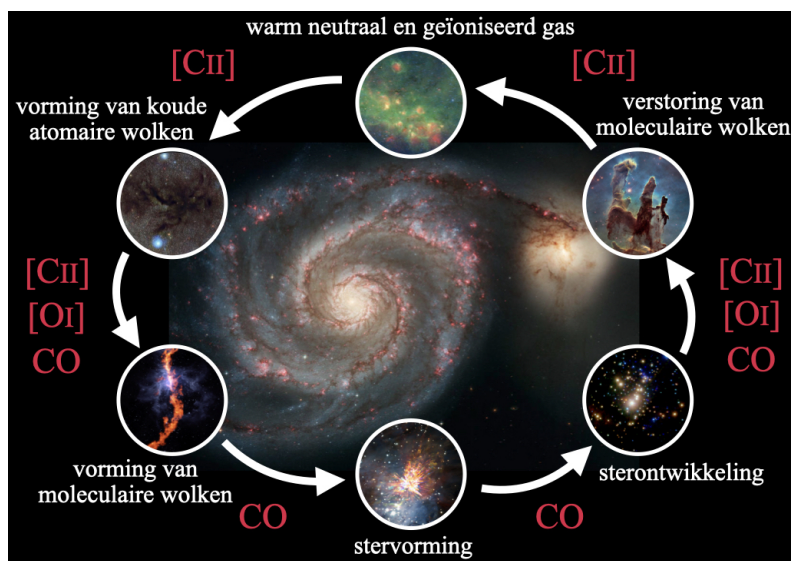
Title: Orion's Dragon and other stories: Feedback by massive stars

Issue date: 2021-03-18

Samenvatting

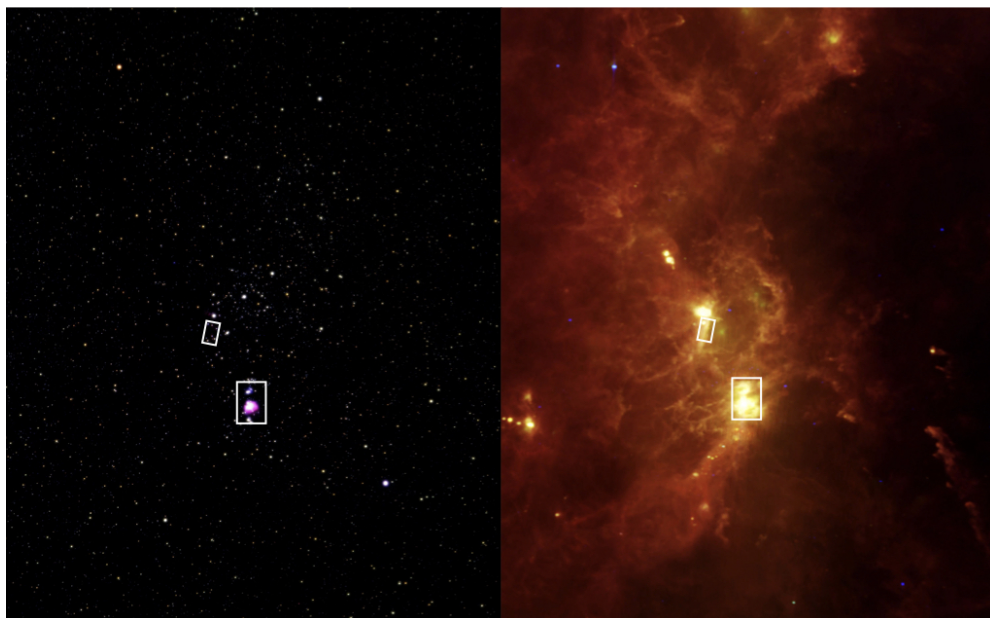
Het interstellair medium

Behalve de met het oog zichtbare sterren bevindt zich ook ijl gas tussen de sterren, het zogenaamde interstellair medium (ISM). Voor het grootste deel (90%) is dit interstellair gas waterstof, ongeveer 10% is helium, en er zijn kleine hoeveelheden sporenelementen zoals koolstof, zuurstof, stikstof en zwavel. Het ISM neemt verschillende vormen aan (naar de toestand waarin waterstof zich bevindt): Ten eerste zijn er moleculaire wolken (waterstof is moleculair en koud), die door samen te klonteren nieuwe sterren kunnen vormen. Ten tweede is er gas dat door de ultraviolet (uv) straling van zware sterren geïoniseerd (en warm) is. Ten derde is er neutraal atomaire gas dat zich vaak aan de overgang van die twee eerste fases bevindt. Dit laatste kan warm of koud zijn, afhankelijk van de mate waarin het aan straling blootgesteld is en zijn dichtheid. Behalve waterstof spelen de overige elementen een belangrijke rol bij het koelen van het ISM, daarover later meer. En behalve gas bevindt zich ook stof in het ISM (ongeveer 1% van de gasmassa in de Melkweg), kleine grafiet- of silicatakortjes, en grote moleculen uit voornamelijk koolstof en waterstof, zogenaamde polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAKs). Die twee zijn belangrijk voor het verhitten van het gas.



Figuur 6.1: De levenscyclus van het interstellair medium. Rode letters benoemen de belangrijkste emissielijnen die in een bepaalde fase waargenomen kunnen worden.

Het materiaal in het interstellair medium (gas en stof) bevindt zich een kringloop en wordt telkens herbruikt (zie figuur 6.1). Beginnend met de vorming van een ster, wordt tijdens de stellaire evolutie materiaal van de ster naar de omgeving afgevoerd, hoe zwaarder de ster hoe meer massa dat is. Het grootste massaverlies lijdt een ster aan het einde van zijn leven, wanneer hij zijn envelop afstoot en verschrompelt tot een witte dwerg of in een supernova ontploft. Vooral supernovae verspreiden grote



Figuur 6.2: De constellatie van Orion in zichtbaar licht (*links*) en infraroodstraling (*rechts*) (beeld: NASA, JPL-Caltech, IRAS/H. McCallon). De witte rechthoeken omlijsten de gebieden die in dit proefschrift bestudeerd zijn, de Paardekopnevel boven en de Orionnevel eronder.

hoeveelheden gas (met nieuwe, zware elementen) en stof in een wijde omtrek van de oorspronkelijke ster. Een gedeelte van de energie die vrij komt (ook tijdens het leven van een ster), verstoort en verscheurt de moleculaire wolk waarin de ster geboren werd. Dat materiaal wordt samen met de stellaire uitvloeisels verhit en vormt een uitgedijde ijle fase van het ISM, al dan niet geïoniseerd, het zogenaamde warme neutrale of geïoniseerde medium. Dat ijle gas koelt af in de loop der tijd en zal uiteindelijk koude neutrale wolken vormen. Door verder af te koelen en onder de invloed van de zwaartekracht samen te trekken, ontstaat eruit een nieuwe moleculaire wolk. Klonten met hogere dichtheid trekken sneller samen en kunnen dicht genoeg worden om nieuwe stervorming in gang te zetten. Zo is de cirkel rond.

Een favoriet studieobject van sterrenkundigen is de Orionnevel en de Orion moleculaire wolk. Behalve de sterren die de constellatie van Orion vormen bevindt zich in die richting een gigantische moleculaire wolk in de ruimte. De moleculaire wolk zendt voornamelijk infraroodstraling en radiogolven uit die met speciale telescopen waargenomen kunnen worden (zie figuur 6.2). De Orionnevel (zie figuur 6.3) is een stervormingsgebied, een gebied waarin nieuwe sterren gevormd worden. In zijn midden bevinden zich vier grote en zware sterren, de zogenaamde Trapeziumsterren, die ervoor zorgen dat het omliggende gas geïoniseerd is (in een zogenoemd H II gebied) en ook in optische en uv golflengtes straalt (zie figuur 6.4). Doordat de Orionnevel dichtbij is, op een afstand van ongeveer 400 parsec (een parsec is 3,26 lichtjaar of $3,09 \times 10^{16}$ m), en buiten de schijf van de Melkweg valt, is hij makkelijk te bestuderen en kunnen zelfs eenvoudige telescopen zijn structuur oplossen (de eerste die een tekening maakte van de structuur van de Orionnevel was Christiaan Huygens in 1659). De Orion moleculaire wolk wordt in twee delen opgesplitst, Orion A in het zuiden en



Figuur 6.3: De Orionnevel, waargenomen door de *Hubble Space Telescope* (beeld: NASA, ESA/M. Robberto).

Figuur 6.4: De Trapeziumsterren in het H II gebied van de Orionnevel, ook Huygensgebied genoemd (beeld: NASA/C. R. O'Dell and S. K. Wong).

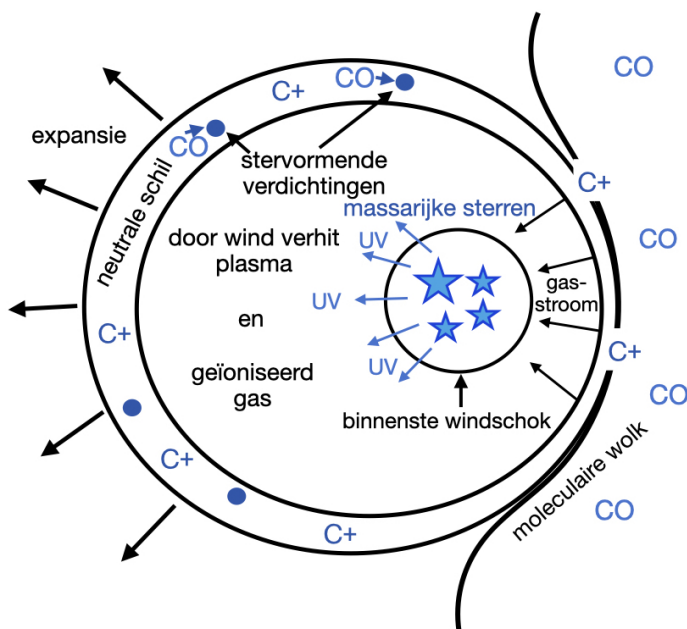
Orion B in het noorden. De Orionnevel bevindt zich aan het oppervlak van de Orion A moleculaire wolk. Ook in de Orion B moleculaire wolk zijn stervormingsgebieden te vinden, de heldersten zijn de reflectievelen NGC 2023 en NGC 2024. In de Orion B moleculaire wolk bevindt zich ook de iconische Paardekopnevel (zie figuur 6.5).

De interacties tussen sterren en het interstellair medium

Sterren, en dan met name massarijke sterren, zenden uv straling uit. Die uv fotonen ioniseren waterstof en andere elementen, afhankelijk van de golflengte, en verhitten het gas door het fotoelektrische effect op stofkorrels en PAKs (het fotoelektrische effect is het fenomeen dat fotonen elektronen uit een materiaal kunnen slaan, die vervolgens een overschot aan energie hebben die ze met het overige gas kunnen delen). Hele zware sterren zenden bovendien ook materiedeeltjes uit, een zogenaamde wind. Die winden kunnen door hun grote snelheid het ISM op miljoenen graden verhitten. Er ontstaat een heet plasma dat Röntgen straling emitteert. Dat plasma zorgt voor een schokgolf die het omliggende gas opveegt en in een dunne schil van neutraal gas comprimeert (zie figuur 6.6). Meestal is zo'n schil niet helemaal symmetrisch en ontstaat er na verloop van tijd een breuk, waardoor het plasma naar buiten kan stromen. Op die manier kunnen door veel sterren samen veel grotere structuren gevormd worden, zoals de Orion-Eridanusbel die geheel de constellatie van Orion omvat. Zoals boven beschreven, zorgen massarijke sterren ervoor dat de moleculaire wolk die hun geboorteplaats was, verstoord en verscheurd wordt. Dit heet negatieve terugkoppeling, omdat verdere stervorming in die moleculaire wolk voorkomen wordt. Er is echter ook de mogelijkheid van positieve terugkoppeling, wanneer de schokgolf, die zich in de moleculaire wolk (of de uitdijende schil) verplaatst, tot compressie van het gas en daardoor nieuwe stervorming leidt. Dit laatste is waargenomen in een aantal stervormingsgebieden, maar



Figuur 6.5: De moleculaire wolk L1630 in de omstreken van de Paardekopnevel in infraroodlicht (blauw: $3,4\ \mu\text{m}$ (voornamelijk sterren), blauwgroen: $4,6\ \mu\text{m}$, groen: $12\ \mu\text{m}$ (emissie van PAKs), rood: $22\ \mu\text{m}$ (emissie van stofdeeltjes)) (beeld: NASA, JPL-Caltech). Links boven de Paardekopnevel bevinden zich de (veel helderdere) reflectienevels NGC 2023 en NGC 2024. Rechts van de Paardekopnevel nadert de ster σ Ori de moleculaire wolk. De rode boog voor de ster is een boegwolk van stofdeeltjes, die de ster voor zich uit schuift.



Figuur 6.6: Schema van een interactie tussen massarijke sterren en een moleculaire wolk.

de precieze omstandigheden waarin of negatieve of positieve terugkoppeling overweegt zijn op dit moment niet voldoende opgehelderd.

Minder massarijke sterren vormen het omliggende gas alleen door middel van hun uv straling. Ook deze straling, of beter gezegd de overdruk die in het geïoniseerde gas ontstaat, kan ervoor zorgen dat een dunne schil van neutraal gas opgeveegd wordt. Deze expanderen doorgaans minder snel dan de door een stellaire wind opgeveegde schillen, maar kunnen ook behoorlijk groot worden. We zullen twee voorbeelden van deze type van expansie zien.

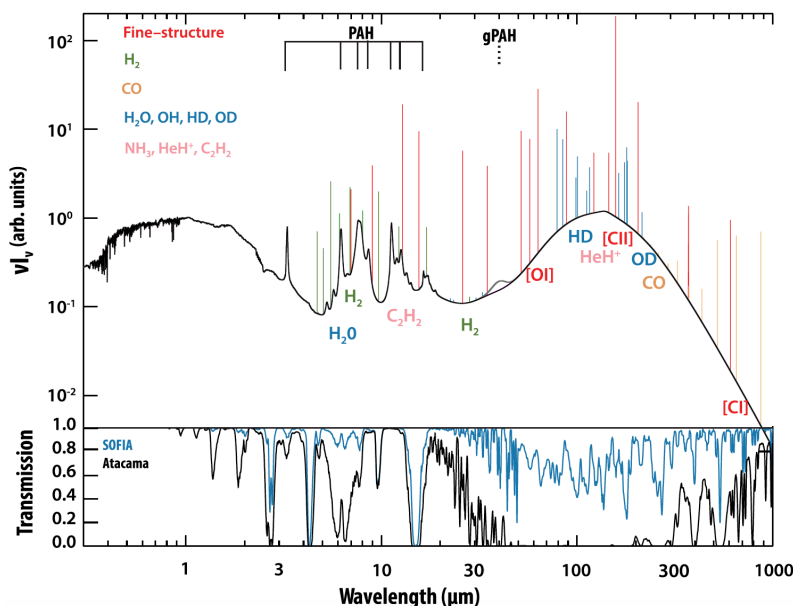
Infraroodstraling en fijnstructuurlijnen

Gas dat verhit is koelt ook af. Hierbij helpen fijnstructuurovergangen van sporenelementen (alles behalve waterstof). De fijnstructuur van een atoom (al dan niet geïoniseerd) is de splitsing van energieniveaus door de koppeling van de elektronenbaanmomentum met de elektronenspin en relativistische effecten. Tussen die gesplitste energieniveaus vinden overgangen met lage energie plaats. De meeste van die overgangen zijn “verboden” overgangen, die dus een hele kleine waarschijnlijkheid hebben. Omdat de tijdschalen waarop het ISM evolueert zo groot zijn en de dichtheid van het ISM zo laag, spelen zij echter de hoofdrol. Verschillende atomen en ionen hebben verschillende fijnstructuurovergangen die in verschillende fases van het ISM aangeslagen worden. Ik beperk me hier tot het bespreken van de fijnstructuurlijn van geïoniseerd koolstof (in spectroscopische notatie [C II]) met een golflengte van $158\ \mu\text{m}$, omdat ik die in dit proefschrift gebruikt heb om twee gebieden in Orion te bestuderen.

Het warme neutrale ISM (met een temperatuur van ongeveer 100 K en een dichtheid van $10^3\text{-}10^5$ deeltjes per kubieke centimeter) koelt voornamelijk door middel van de [C II] lijn af. Hier is waterstof atomair of moleculair, maar koolstof is nog steeds geïoniseerd door de invallende uv straling. Geïoniseerd waterstofgas bevat ook koolstofionen, maar de [C II] emissie is daar minder prominent omdat andere overgangen een grotere bijdrage leveren aan de koeling. Behalve de lijnemissie is er ook continuümmissie van de stofkorreltjes en de emissie van de PAKs. Figuur 6.7 laat zien hoe een typisch infraroodspectrum van het ISM eruit ziet, namelijk een combinatie van continuümmissie en lijnemissie.

Dit proefschrift

In dit proefschrift heb ik gebruik gemaakt van infraroodwaarnemingen gedaan met het upGREAT instrument op SOFIA. SOFIA (“Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy”) is een gemodificeerde Boeing 747-SP uitgerust met een spiegel van 2,5 m doorsnede. In de stratosfeer wordt infraroodstraling (golflengtes tussen 3 en 500 micrometer) veel minder geabsorbeerd door waterdamp in de atmosfeer (zie figuur 6.7), waardoor waarnemingen mogelijk zijn. Het instrument upGREAT (“upgraded German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies”) is een heterodyne ontvanger, wat betekent dat het signaal van een lokale oscillator in het astronomische signaal gemengd wordt door middel van een mixer. Het resulterende elektronische signaal kan door elektronische bouwstenen versterkt worden en levert spectra met hoge spectrale resolutie. De spectraallijn die we gebruiken is de fijnstructuurlijn van geïoniseerde koolstof, [C II]. Met behulp van hoge-resolutie spectra met hoge ruimtelijke resolutie (voor de [C II] lijn gemeten door SOFIA/upGREAT is dit een spectrale resolutie van



Figuur 6.7: *Boven:* Een model van interstellaire emissie (continuum en lijnen). *Onder:* Atmosferische transmissie voor infraroodstraling vanaf de grond (Atacama) en SOFIA (afbeelding: K. Ennico et al., JAI 7,4, 2018).

0,2 km/s en een ruimtelijke resolutie van 15,9 boogseconden) kan men een nauwkeurig beeld schetsen van de bewegingen van het interstellaire gas. Emissie van geïoniseerde koolstof, de [C II] lijn, kan in een aantal fases van het ISM waargenomen worden: oppervlakken van moleculaire wolken in de buurt van een ster, het warme neutrale of geïoniseerde ISM, en koude atomaire wolken. Op galactische schaal leveren al deze fases een bijdrage aan de totale [C II] emissie, maar onze waarnemingen beperken zich tot gebieden dichtbij massarijke sterren.

In hoofdstuk 2 kijken we naar de Paardekopnevel. Deze nevel is een uitstulping van de L1630 moleculaire wolk die deel uitmaakt van de Orion B moleculaire wolk. De Paardekopnevel en L1630 eromheen worden verhit door de O9.5V ster σ Ori, die de wolk nadert en verdampt. Aan het oppervlak van de wolk ontstaat zo een photodissociatiegebied (PDR, “photodissociation region”) met de typische gelaagde structuur: Aansluitend aan het H II gebied, het gebied waarin waterstof geïoniseerd is, bestaat de bovenste laag van de wolk uit atomaire waterstofgas waarin koolstof nog geïoniseerd is. Wat dieper in de wolk combineert waterstof tot waterstofmoleculen, maar koolstof is nog steeds geïoniseerd. Pas nog dieper wordt koolstof neutral en vormt zich ook snel koolstofmonoxide (CO), het na waterstof meest abundante molecuul in het ISM. Waar koolstof geïoniseerd is, koelt het gas af door emissie van de verboden [C II] lijn en andere verboden lijnen van sporenelementen (zuurstof, stikstof, zwavel). Het CO-bevattende gas koelt af door emissie van rotationele lijnen van CO en andere moleculen. Deze lijnen kunnen gemeten worden radiotelescopisch zoals de IRAM 30m telescoop. Voor de studie van de Paardekopnevel gebruiken wij de laagste rotationele overgang van CO, de CO(1-0) lijn met een golflengte van 2,6 mm. Verder vergelijken wij de [C II] emissie met de continuum ver-infrarood emissie ($\lambda = 40\text{-}500 \mu\text{m}$), die door stofdeeltjes geïmitteerd wordt, en de emissie van PAKs in de *Spitzer*/IRAC

8 μm band. De *Herschel*/PACS en SPIRE banden op 70 μm , 160 μm , 250 μm , 350 μm en 500 μm leveren bovendien schattingen voor de optische diepte van het stof en de stoftemperatuur. We vinden goede correlaties tussen de [C II] emissie en de PAH 8 μm emissie zoals ook de geïntegreerde ver-infrarood (FIR, “far-infrared”) emissie, wat laat zien dat de [C II] emissie van het oppervlak van de wolk komt. De CO(1-0) emissie is complementair aan de [C II] emissie, wat aantoont dat wij de wolk in een “edge-on” configuratie waarnemen, van de zijkant dus. Dat compliceert de vergelijking van de waarnemingen met PDR modellen enigszins, maar we slagen erin om de waarnemingen goed te reproduceren met edge-on PDR modellen. Het merendeel van de [C II] emissie rondom de Paardekopnevel stamt van de PDR oppervlakken, en maar 5% kunnen aan het H II gas toegeschreven worden.

In hoofdstuk 3 maken wij wederom gebruik van de [C II] lijn, maar deze keer waargenomen over een veel groter gebied (ruim een vierkante graad), namelijk de Orionnevel (M42) in de Orion A moleculaire wolk. Hier zien we de kracht van hoge spectrale en ruimtelijke resolutie. Door middel van positie-snelheidsdiagrammen kunnen wij de expansie van de Orionnevel zichtbaar maken en voor het eerst kwantificeren. De hete sterren in de Orionnevel, en met name de zwaarste van de Trapezium sterren, de O7V ster θ^1 Ori C, verhitten het ISM tot heet plasma dat Röntgen straling uitzendt. Het hete plasma expandeert en veegt daardoor een schil van koeler neutraal gas op. Die schil, met een straal van 2,5 parsec, straalt in [C II] emissie. We bepalen de massa van de schil uit de optische diepte van het stof verkregen uit de *Herschel*/PACS en SPIRE banden op 70 μm , 100 μm , 160 μm , 250 μm , 350 μm en 500 μm . Met een massa van 1.500 zonsmassa’s en een snelheid van 13 km/s wordt een groot gedeelte van gasmassa behorend bij het stervormingsgebied, de moleculaire kern OMC1 (“Orion molecular core 1”), uit het gebied uitgestoten. De expansiekenmerken kunnen goed beschreven worden door een eenvoudig analytisch model voor wind-gedreven gasbellen. Dat geeft een schatting voor de leeftijd van de schil, namelijk 200.000 jaar. De schil zal uiteindelijk openbreken en het hete plasma zal uitvloeien in het omliggende medium en de grotere gasstructuren van de Orion-Eridanusbel aanvullen.

Hoofdstuk 4 bespreekt de expanderende schillen van de nevels M43 en NGC 1973, 1975 en 1977 (kort NGC 1977). Beiden liggen in de buurt van de Orionnevel en zijn onderdeel van dezelfde [C II] kaart. In tegenstelling met de Orionnevel bevatten M43 en NGC 1977 minder zware sterren (de B0.5V ster NU Ori en de B1V ster 42 Orionis, respectievelijk) die geen noemenswaardige stellaire wind produceren. Deze twee nevels zijn H II gebieden met een omgevende neutrale schil. De schil van M43 met een straal van 0,3 parsec heeft een massa van 8 zonsmassa’s en expandeert met een snelheid van 6 km/s. De schil van NGC 1977 met een straal van 1,0 parsec heeft een massa van 700 zonsmassa’s en expandeert met 1,5 km/s. Beiden kunnen goed beschreven worden door een analytisch model van expanderende H II gebieden. Deze geven een leeftijd van 20.000 jaar voor M43 en een leeftijd van 400.000 jaar voor NGC 1977. De leeftijd van de schil kan niet meteen vertaald worden in de leeftijd van de ster, want jonge sterren kunnen lang ingebed zijn in de moleculaire wolk voor ze in het ijle medium terecht komen waar ze een expansie op gang kunnen zetten.

In hoofdstuk 5 onderzoeken wij in hoeverre de [C II] emissie van de Orionnevel een verklaring geeft voor [C II] waarnemingen van extragalactische bronnen. Omdat de [C II] lijn de helderste FIR lijn is, kan zij in bronnen op grote afstand waargenomen worden, en het is aangetoond dat er een correlatie is tussen de [C II] luminositeit en het ster-vormingspotentiaal van een sterrenstelsel. Wij onderzoeken eerst de correlaties tussen de [C II] intensiteit in de Orionnevel en de stof-70 μm , PAK-8 μm , geïntegreerde

FIR en CO(2-1) intensiteit ($\lambda = 1,3$ mm). We zien goede correlaties tussen [C II] en de eerste drie, hoewel deze niet lineair schalen maar met een macht kleiner dan 1. De relatie tussen [C II] en CO(2-1) toont een trend, maar ook grote spreiding. In extragalactische bronnen van hoge FIR luminositeit wordt een verminderde [C II] luminositeit waargenomen. Wij zien dit ook in onze data: De [C II] intensiteit in verhouding met de FIR intensiteit neemt af met stijgende FIR intensiteit in de buurt van de Trapezium sterren. Wij wijten dit aan het belang van gaskoeling door de zuurstof fijnstructuurlijn [O I] op $63 \mu\text{m}$. Een klein effect kan ook een minder efficiënt verwarmingsmechanisme zijn door toenemende ionisatie van PAKs en stofkorrels in de buurt van de hete sterren. We zien echter ook een verminderde [C II]/FIR verhouding in gezichtslijnen met grote kolommen van stof, warm of koud. Een mogelijke interpretatie van de [C II]/FIR deficiëntie zou dan ook een in termen van een FIR overschot zijn. Als we de [C II] luminositeit met het stervormingspotentiaal van de Orionnevel vergelijken, zoals dat bekend is uit tellingen van jonge stellaire objecten, zien we dat de formules die op extragalactische waarnemingen geijkt zijn de daadwerkelijke stellaire inhoud onderschatten, ongeveer met één à twee ordes van grote. Dit zou erop kunnen wijzen dat grote oppervlakken die minder intensieve straling uitzenden wezenlijk bijdragen aan galactische [C II] emissie. Wij zien een trend in die richting ook in onze data.

Hoofdstuk 6 is een uitwerking van het PDR aspect, dat in hoofdstuk 5 ten behoeve van overzichtelijkheid en begrijpelijkheid onderbelicht bleef. Allereerst splitsen wij het gebied van de hele [C II] kaart in Orion A in vier gebieden: de schil van de Orionnevel, het moleculaire filament rondom de moleculaire kern OMC4 in het midden van die schil, M43 en NGC 1977. De laatste twee gebieden worden wederom onderverdeeld in het H II gebied, dichte moleculaire gebieden en de [C II]-emitterende schil. We zien eigenlijk dat de correlaties die we in het voorafgaande hoofdstuk globaal hebben onderzocht ([C II] intensiteit versus stof- $70 \mu\text{m}$, PAK- $8 \mu\text{m}$ en FIR intensiteit), weinig variaties tonen in die vier gebieden apart. Alleen de correlatie tussen de [C II] intensiteit en de CO(2-1) intensiteit is ingewikkelder. Deze onderzoeken we nader door spectra in representatieve gebieden te bestuderen. Dat laat zien dat er in elke emissielijn meerdere componenten zijn die niet altijd met elkaar in verband te brengen zijn. Mogelijk dat de dynamiek van de gebieden, onder invloed van de sterren, ons hier parten speelt. Dit laat ook zien dat stervormingsgebieden heel complex zijn en dat het eigenlijk niet mogelijk is om fysische eigenschappen uit het meten van een gemiddelde lijn (zoals in extragalactische studies gebeurt) te achterhalen. We zien ook dat het door die veelheid aan componenten moeilijk is om de emissie weer te geven in PDR modellen. Desondanks komen onze edge-on PDR modellen bij het voorspellen van de [C II] intensiteit aardig in de buurt, maar we merken wel op dat er afwijkingen zijn. Tot slot relateren wij de [C II] koelingsefficiëntie, zoals gemeten door de [C II]/FIR intensiteitsverhouding, aan de karakteristieken van de PAKs afgeleid uit PAK spectra. We zien echter niet dat de PAK ionisatie of molecuulafmetingen significant varieëren, maar de [C II]/FIR efficiëntie doet dat wel. Mogelijk betekent dat dat kleine stofkorrels ook belangrijk zijn voor de verhitting van het gas. Hier zouden toekomstige missies, zoals de *James Webb Space Telescope*, licht in het donker kunnen brengen.

Kortom, de waarnemingen die ik in dit proefschrift bestudeerd heb, laten de rijkdom van stervormingsgebieden zien. Niet alleen is er een rijkdom aan verschillende emissielijnen (de belangrijkste zijn [C II], [O I] en de CO lijnen), maar ook een rijkdom aan emissiecomponenten, die in elke lijn weer schijnen te verschillen. Dit laat onverlet dat de expansiebewegingen op grote schaal zeer nauwkeurig bepaald kunnen worden. Opvolgend op dit proefschrift zal de SOFIA FEEDBACK C⁺ Legacy Survey

11 stervormingsgebieden in de Melkweg waarnemen en de mate waarin sterren hun omgeving beïnvloeden met grotere nauwkeurigheid dan gekend kunnen kwantificeren. Dit zal ons in staat stellen om beter te begrijpen hoe ook veel grotere structuren in ons heelal, die wezenlijk door stellaire terugkoppelingen bepaald worden, ontstaan en vergaan.

