



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

Zusammenfassung

Das interstellare Medium

Neben den mit bloßem Auge sichtbaren Sternen befindet sich auch dünnes Gas zwischen den Sternen, das sogenannte interstellare Medium (ISM). Zum größten Teil (90%) ist dieses interstellare Gas Wasserstoff, ungefähr 10% ist Helium, und es enthält kleine Mengen Spurenelemente sowie Kohlenstoff, Sauerstoff und Schwefel. Das ISM nimmt verschiedene Formen an (nach dem Zustand, in dem Wasserstoff sich befindet): Zum Ersten sind da die Molekülwolken (Wasserstoff ist molekular und kalt), die, indem sie zusammenfallen, neue Sterne bilden können. Zum Zweiten gibt es Gas, das durch die Ultraviolettstrahlung (UV) von schweren Sternen ionisiert (und warm) ist. Zum Dritten gibt es neutrales atomares Gas, das sich oftmals am Übergang zwischen den beiden erstgenannten Phasen befindet. Diese letzte Phase kann warm oder kalt sein, je nach dem Maß, in dem es Strahlung ausgesetzt ist, und seiner Dichte. Außer Wasserstoff spielen die übrigen Elemente eine wichtige Rolle beim Kühlen des ISM, darüber später mehr. Und außer Gas befindet sich auch Staub im ISM (ungefähr 1% von der Gasmasse in der Milchstraße), kleine Grafit- oder Silikatkörnchen, und große Moleküle aus hauptsächlich Kohlenstoff und Wasserstoff, sogenannte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs). Diese beiden sind wichtig für das Heizen des Gases.

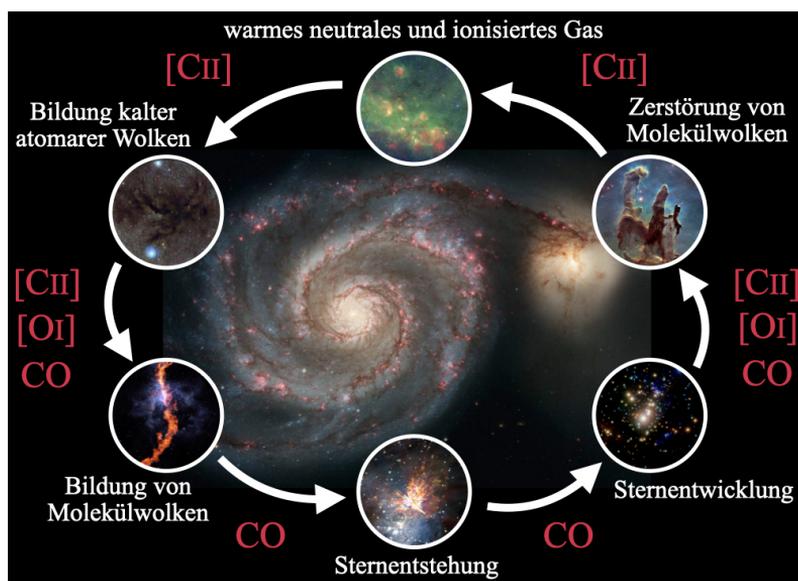


Abbildung 6.1: Der Lebenszyklus des interstellaren Mediums. Rote Buchstaben benennen die wichtigsten Emissionslinien, die in einer bestimmten Phase beobachtet werden können.

Das Material im interstellaren Medium (Gas und Staub) befindet sich in einem Kreislauf und wird stets wiederverwendet (siehe Abbildung 6.1). Beginnend bei der Entstehung eines Sternes, wird während der stellaren Evolution Material vom Stern in die Umgebung abgeführt, je schwerer der Stern, desto mehr Masse ist das. Den größten Masseverlust erleidet ein Stern am Ende seines Lebens, wenn er seine Hülle abstößt und zu einem weißen Zwerg schrumpft oder als Supernova explodiert. Vor

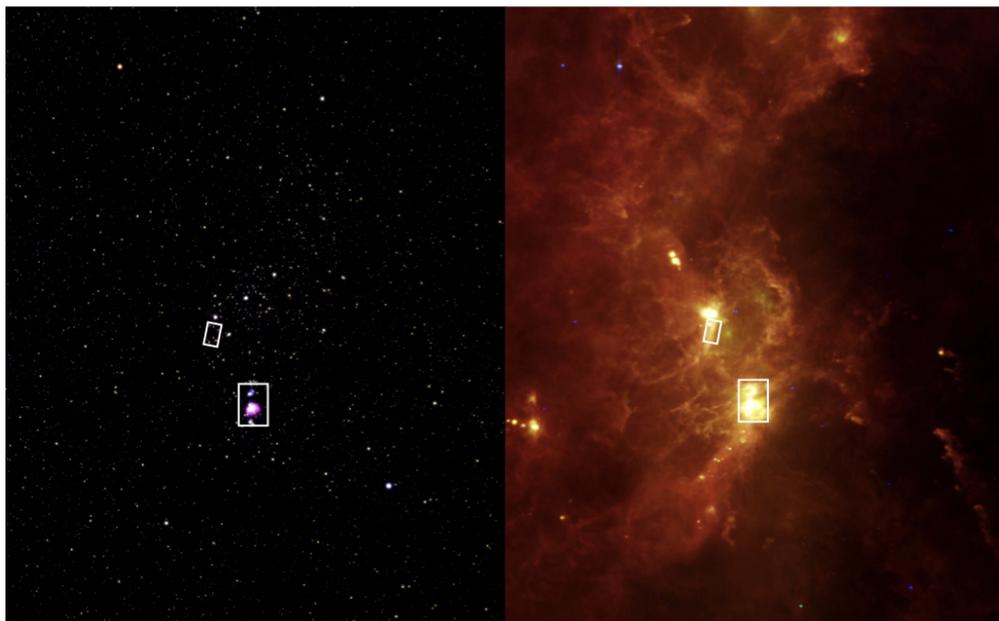


Abbildung 6.2: Das Sternbild von Orion in sichtbarem Licht (*links*) und Infrarotstrahlung (*rechts*) (Bild: NASA, JPL-Caltech, IRAS/H. McCallon). Die weißen Rechtecke umrahmen die Gebiete, die in dieser Arbeit studiert werden, den Pferdekopfnebel oben und den Orionnebel darunter.

allem Supernovae verteilen große Mengen Gas (mit neuen, schweren Elementen) und Staub in einer weiten Umgebung des ursprünglichen Sterns. Ein Teil der Energie, die frei wird (auch zu Lebzeiten des Sterns), zerstört und zerreißt die Molekülwolke, in der der Stern geboren wurde. Dieses Material wird zusammen mit den stellaren Ausflüssen aufgeheizt und bildet eine sich ausdehnende dünne Phase des ISM, entweder ionisiert oder neutral, das sogenannte warme neutrale oder ionisierte Medium. Dieses dünne Gas kühlt im Laufe der Zeit ab und bildet schließlich kalte neutrale Wolken. Indem es weiter abkühlt und sich unter Einfluss der Schwerkraft zusammenzieht, entsteht aus diesem eine neue Molekülwolke. Klumpen mit höherer Dichte ziehen sich schneller zusammen und können dicht genug werden, sodass neue Sternentstehung in Gang gesetzt wird. So schließt sich der Kreis.

Ein beliebtes Forschungsobjekt von Astronomen ist der Orionnebel und die Orion-Molekülwolke. Neben den Sternen, die das Sternbild von Orion bilden, befindet sich in dieser Richtung auch eine gigantische Molekülwolke im Raum. Die Molekülwolke sendet vornehmlich Infrarotstrahlung und Radiowellen aus, die mit speziellen Teleskopen beobachtet werden können (siehe Abbildung 6.2). Der Orionnebel (siehe Abbildung 6.3) ist ein Sternentstehungsgebiet, ein Gebiet, in dem neue Sterne entstehen. In seiner Mitte befinden sich vier große und schwere Sterne, die sogenannten Trapeziumsterne, die dafür sorgen, dass das umgebende Gas ionisiert ist (in einem sogenannten H II-Gebiet) und auch in optischer und UV-Strahlung strahlt (siehe Abbildung 6.4). Dadurch dass der Orionnebel nicht weit entfernt ist, mit einem Abstand von ungefähr 400 Parsec (ein Parsec sind 3,26 Lichtjahre oder $3,09 \times 10^{16}$ m), und außerhalb der Scheibe der Milchstraße liegt, ist er leicht zu untersuchen und selbst einfache Teleskope können seine Struktur auflösen (der Erste, der eine Zeichnung von der Struktur des



Abbildung 6.3: Der Orionnebel, beobachtet vom *Hubble Space Telescope* (Bild: NASA, ESA/M. Robberto).



Abbildung 6.4: Die Trapeziumsterne im H II-Gebiet des Orionnebels, auch Huygensgebiet genannt (Bild: NASA/C. R. O'Dell and S. K. Wong).

Orionnebels machte, war Christiaan Huygens im Jahr 1659). Die Orion-Molekülwolke wird in zwei Teile aufgeteilt, Orion A im Süden und Orion B im Norden. Der Orionnebel befindet sich an der Oberfläche der Orion-A-Molekülwolke. Auch in der Orion-B-Molekülwolke sind Sternentstehungsgebiete zu finden, die hellsten sind die Reflektionsnebel NGC 2023 und NGC 2024. In der Orion-B-Molekülwolke befindet sich auch der ikonische Pferdekopfnebel (siehe Abbildung 6.5).

Die Interaktionen zwischen Sternen und dem interstellaren Medium

Sterne, und vor allem massereiche Sterne, senden UV-Strahlung aus. Diese UV-Photonen ionisieren Wasserstoff und andere Elemente, je nach Wellenlänge, und erhitzen das Gas durch den photoelektrischen Effekt auf Staubkörnern und PAKs (der photoelektrische Effekt ist das Phänomen, dass Photonen Elektronen aus einem Material schlagen können, die dann einen Energieüberschuss haben, den sie auf das übrige Gas verteilen können). Sehr schwere Sterne senden außerdem Materieteilchen aus, einen sogenannten Wind. Diese Winde können aufgrund ihrer großen Geschwindigkeit das ISM auf Millionen Grad erhitzen. Es entsteht ein heißes Plasma, das Röntgenstrahlung emittiert. Dieses Plasma sorgt für eine Schockwelle, die das umgebende Gas aufkehrt und in einer dünnen Schale von neutralem Gas komprimiert (siehe Abbildung 6.6). Meistens ist solch eine Schale nicht ganz symmetrisch und es entsteht nach einiger Zeit eine Bruchstelle, wodurch das Plasma herausströmen kann. Auf diese Weise können durch viele Sterne zusammen viel größere Strukturen gebildet werden, sowie die Orion-Eridanus-Blase, die das gesamte Sternbild von Orion umgibt. Wie oben beschrieben, sorgen massereiche Sterne dafür, dass die Molekülwolke, die ihr Geburtsort war, auseinandergerissen wird. Dies heißt negative Rückkopplung, da weitere Stern-

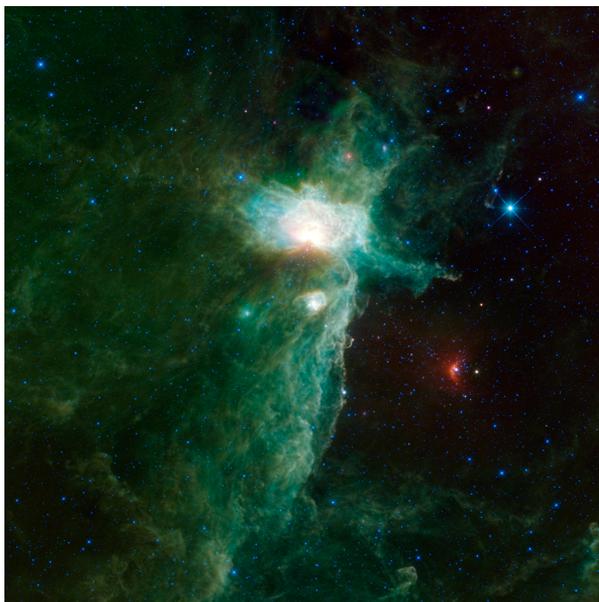


Abbildung 6.5: Die Molekülwolke L1630 in der Umgebung des Pferdekopfnebels in Infrarotlicht (blau: $3,4 \mu\text{m}$ (hauptsächlich Sterne), blaugrün: $4,6 \mu\text{m}$, grün: $12 \mu\text{m}$ (Emission von PAKs), rot: $22 \mu\text{m}$ (Emission von Staubteilchen)) (Bild: NASA, JPL-Caltech). Links über dem Pferdekopfnebel befinden sich die (viel helleren) Reflektionsnebel NGC 2023 und NGC 2024. Rechts vom Pferdekopfnebel nähert sich der Stern σ Ori der Molekülwolke. Der rote Bogen vor dem Stern ist eine Bugwelle von Staubteilchen, die der Stern vor sich her schiebt.

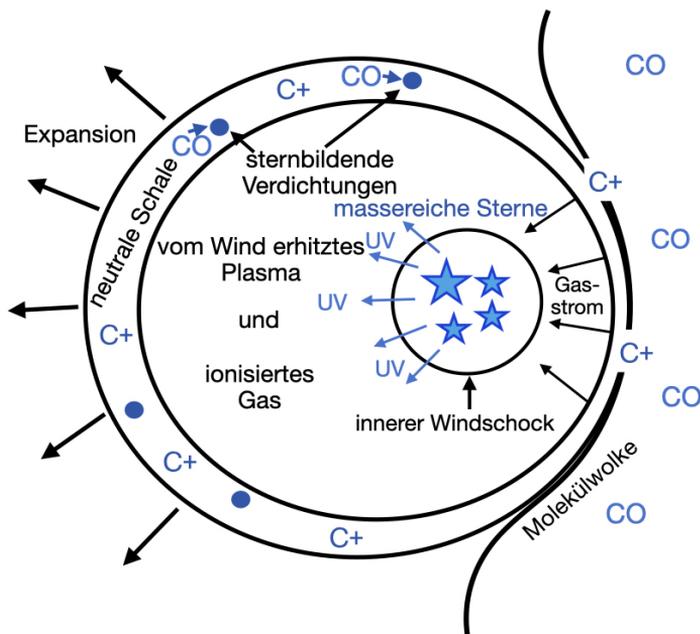


Abbildung 6.6: Schema einer Interaktion zwischen massereichen Sternen und einer Molekülwolke.

entstehung in der Molekülwolke verhindert wird. Es gibt jedoch auch die Möglichkeit der positiven Rückkopplung, wenn die Schockwelle, die sich in die Molekülwolke (oder in die sich ausdehnenden Schale) bewegt, zur Kompression des Gases und dadurch zu neuer Sternentstehung führt. Dieses letzte wurde in einigen Sternentstehungsgebieten beobachtet, aber die genauen Umstände, unter denen negative oder positive Rückkopplung vorherrschend ist, sind im Moment nicht ausreichend bekannt.

Weniger massereiche Sterne formen das umgebende Gas nur mittels ihrer UV-Strahlung. Auch diese Strahlung, oder besser der Überdruck, der im ionisierten Gas entsteht, kann dafür sorgen, dass eine dünne Schale von neutralem Gas zusammengekehrt wird. Diese expandieren meistens weniger schnell als die durch einen stellaren Wind gebildeten Schalen, aber auch sie können ansehnlich groß werden. Wir werden zwei Beispiele dieses Typs von Expansion sehen.

Infrarotstrahlung und Feinstrukturlinien

Gas, das erhitzt ist, kühlt auch ab. Hierbei helfen Feinstrukturübergänge von Spurenelementen (alles außer Wasserstoff). Die Feinstruktur eines Atoms (oder Ions) ist die Aufspaltung von Energieniveaus durch die Kopplung des Elektron-Bahn-Impulses mit dem Elektronenspin und relativistische Effekte. Zwischen den aufgespaltenen Energieniveaus finden Übergänge mit niedriger Energie statt. Die meisten dieser Übergänge sind „verbotene“ Übergänge, die also eine sehr kleine Wahrscheinlichkeit haben. Da die Zeitskalen, in denen das ISM evoluiert, so groß sind, und die Dichte des ISM so gering, spielen sie jedoch die Hauptrolle. Verschiedene Atome und Ionen haben verschiedene Feinstrukturübergänge, die in verschiedenen Phasen des ISM angeregt werden. Ich beschränke mich hier auf die Besprechung der Feinstrukturlinie von ionisiertem Kohlenstoff (in spektroskopischer Notation [C II]) mit einer Wellenlänge von $158\ \mu\text{m}$, da ich diese in dieser Doktorarbeit benutzt habe, um zwei Gebiete in Orion zu studieren.

Das warme neutrale ISM (mit einer Temperatur von ungefähr 100 K und einer Dichte von 10^3 - 10^5 Teilchen per Kubikzentimeter) kühlt hauptsächlich mittels der [C II]-Linie ab. Hier ist Wasserstoff atomar oder molekular, aber Kohlenstoff ist noch immer ionisiert durch die einfallende UV-Strahlung. Ionisiertes Wasserstoffgas enthält auch Kohlenstoffionen, aber die [C II]-Emission ist dort weniger prominent, da andere Übergänge einen größeren Beitrag zur Kühlung liefern. Neben der Linienemission gibt es auch Kontinuumsmission der Staubkörnchen und Emission der PAKs. Abbildung 6.7 zeigt ein typisches Infrarotspektrum des ISM, eine Kombination von Kontinuumsmission und Linienemission.

Diese Doktorarbeit

In dieser Arbeit habe ich von Infrarotbeobachtungen, ausgeführt durch das upGREAT-Instrument auf SOFIA, Gebrauch gemacht. SOFIA („Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy“) ist eine modifizierte Boeing 747-SP, ausgerüstet mit einem Spiegel von 2,5 m Durchmesser. In der Stratosphäre wird Infrarotstrahlung (Wellenlängen zwischen 3 und 500 Mikrometern) viel weniger durch Wasserdampf in der Atmosphäre absorbiert (siehe Abbildung 6.7), wodurch Beobachtungen möglich sind. Das Instrument upGREAT („upgraded German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies“) ist ein heterodyner Empfänger, was bedeutet, dass das Signal eines lokalen Oszillators in das astronomische Signal gemischt wird mittels eines Mixers. Das resultie-

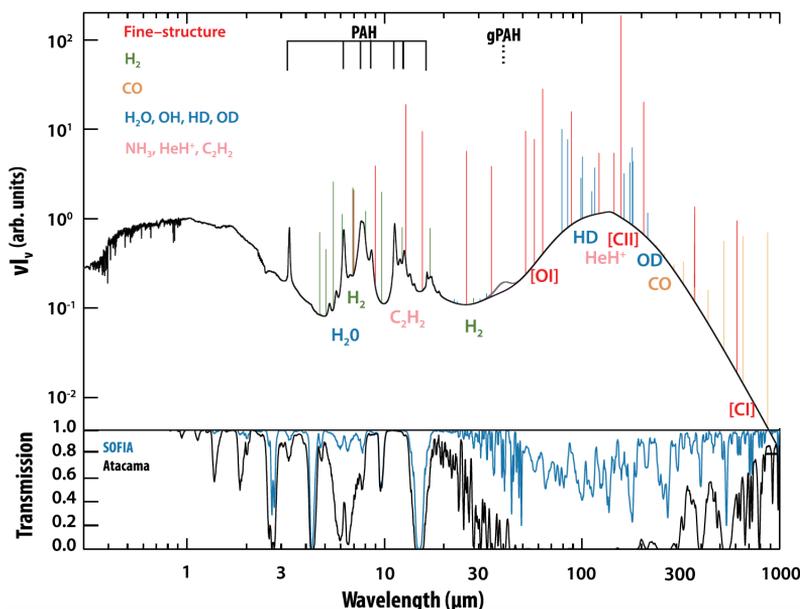


Abbildung 6.7: *Oben:* Ein Modell interstellarer Emission (Kontinuum und Linien). *Unten:* Atmosphärische Transmission für Infrarotstrahlung von der Erde (Atacama) und SOFIA aus (Abbildung: K. Ennico et al., JAI 7,4, 2018).

rende elektronische Signal kann durch elektronische Bausteine verstärkt werden und liefert Spektren mit hoher spektraler Auflösung. Die Spektrallinie, die wir benutzen, ist die Feinstrukturlinie von ionisiertem Kohlenstoff, [C II]. Mit Hilfe von hochauflösten Spektren mit hoher räumlicher Auflösung (für die [C II]-Linie, gemessen von SOFIA/upGREAT, ist das eine spektrale Auflösung von 0,2 km/s und eine räumliche Auflösung von 15,9 Bogensekunden) kann man ein detailliertes Bild skizzieren von den Bewegungen des interstellaren Gases. Emission von ionisiertem Kohlenstoff, die [C II]-Linie, kann in verschiedenen Phasen des ISM beobachtet werden: Oberflächen von Molekülwolken in der Nähe eines Sterns, das warme neutrale oder ionisierte ISM, und kalte atomare Wolken. Auf galaktischen Skalen liefern all diese Phasen einen Beitrag zur totale [C II]-Emission, aber unsere Beobachtungen beschränken sich auf Gebiete in der Nähe von massereichen Sternen.

In Kapitel 2 schauen wir uns den Pferdekopfnebel an. Dieser Nebel ist eine Ausstülpung der L1630-Molekülwolke, die ein Teil der Orion-B-Molekülwolke ist. Der Pferdekopfnebel und L1630 darum herum werden erhitzt durch den O9.5V-Stern σ Ori, der sich der Wolke nähert und sie verdampft. An der Oberfläche der Wolke entsteht so ein Photodissoziationsgebiet (PDR, „photodissociation region“) mit der typischen geschichteten Struktur: Anschließend an das H II-Gebiet, das Gebiet, worin Wasserstoff ionisiert ist, besteht die oberste Schicht der Wolke aus atomarem Wasserstoff, worin Kohlenstoff noch ionisiert ist. Etwas tiefer in der Wolke kombiniert Wasserstoff zu Wasserstoffmolekülen, aber Kohlenstoff ist noch immer ionisiert. Erst noch etwas tiefer in der Wolke wird Kohlenstoff neutral und es bildet sich auch schnell Kohlenstoffmonoxid (CO), das nach Wasserstoff meist abundante Molekül im ISM. Wo Kohlenstoff ionisiert ist, kühlt sich das Gas durch Emission der verbotenen [C II]-Linie und andere verbotenen Linien von Spurenelementen (Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel).

Das CO-enhaltende Gas kühlt sich durch Emission von Rotationslinien von CO und anderen Molekülen. Diese Linien können durch Radioteleskope wie das IRAM-30m-Teleskop gemessen werden. Für die Studie des Pferdekopfnebels benutzen wir den niedrigsten Rotationsübergang von CO, die CO(1-0)-Linie mit einer Wellenlänge von 2,6 mm. Weiterhin vergleichen wir die [C II]-Emission mit der Kontinuumsferninfrarotemission ($\lambda = 40\text{-}500\ \mu\text{m}$), die von Staubteilchen emittiert wird, und der Emission von PAKs im *Spitzer*/IRAC-8 μm -Band. Die *Herschel*/PACS- und SPIRE-Bänder bei 70 μm , 160 μm , 250 μm , 350 μm und 500 μm liefern außerdem Schätzungen für die optische Tiefe des Staubs und die Staubtemperatur. Wir finden gute Korrelationen zwischen der [C II]-Emission und der PAK-8 μm -Emission sowie der integrierten Ferninfrarotemission (FIR, „far-infrared“), was zeigt, dass die [C II]-Emission von der Oberfläche der Wolke stammt. Die CO(1-0)-Emission ist komplementär zu der [C II]-Emission, was zeigt, dass wir die Wolke in einer „edge-on“-Konfiguration beobachten, von der Seite also. Das verkompliziert den Vergleich der Beobachtungen mit PDR-Modellen, aber wir können die Beobachtungen trotzdem gut reproduzieren mit edge-on-PDR-Modellen. Der Großteil der [C II]-Emission rund um den Pferdekopfnebel stammt von den PDR-Oberflächen und nur 5% können dem H II-Gebiet zugeschrieben werden.

In Kapitel 3 machen wir wiederum Gebrauch von der [C II]-Linie, aber dieses Mal über ein viel größeres Gebiet (gut ein Quadratgrad) beobachtet, nämlich den Orionnebel (M42) in der Orion-A-Molekülwolke. Hier sehen wir die Kraft hoher spektraler und räumlicher Auflösung. Mittels Positionsgeschwindigkeitsdiagrammen können wir die Expansion des Orionnebels sichtbar machen und zum ersten Mal quantifizieren. Die heißen Sterne im Orionnebel, und vor allem der schwerste der Trapeziumsterne, der O7V-Stern θ^1 Ori C, erhitzen das ISM zu einem heißen Plasma, das Röntgenstrahlung aussendet. Das heiße Plasma expandiert und kehrt dadurch eine Schale von kühlerem neutralem Gas auf. Die Schale, mit einem Radius von 2,5 Parsec, strahlt in [C II]-Emission. Wir bestimmen die Masse der Schale aus der optischen Tiefe des Staubs, gewonnen aus den *Herschel*/PACS- und SPIRE-Bändern bei 70 μm , 100 μm , 160 μm , 250 μm , 350 μm und 500 μm . Mit einer Masse von 1.500 Sonnenmassen und einer Geschwindigkeit von 13 km/s wird ein großer Teil der Gasmasse, die zu dem Sternentstehungsgebiet, dem Moleküllern OMC1 („Orion molecular core 1“), gehört, aus dem Gebiet ausgestoßen. Die Expansionscharakteristiken werden gut beschrieben durch ein einfaches analytisches Modell für windgetriebene Gasblasen. Das gibt eine Schätzung des Alters der Schale, nämlich 200.000 Jahre. Die Schale wird schließlich aufbrechen und das heiße Plasma wird in das umliegende Medium ausfließen und die größeren Gasstrukturen der Orion-Eridanus-Blase auffüllen.

Kapitel 4 bespricht die expandierenden Schalen der Nebel M43 sowie NGC 1973, 1975 und 1977 (kurz NGC 1977). Beide liegen in der Nähe des Orionnebels und sind Teil derselben [C II]-Karte. Im Gegenteil zum Orionnebel enthalten M43 und NGC 1977 weniger schwere Sterne (den B0.5V-Stern NU Ori sowie den B1V-Stern 42 Orionis), die keinen nennenswerten stellaren Wind produzieren. Diese zwei Nebel sind H II-Gebiete mit einer umgebenden neutralen Schale. Die Schale von M43 mit einem Radius von 0,3 Parsec hat eine Masse von 8 Sonnenmassen und expandiert mit einer Geschwindigkeit von 6 km/s. Die Schale von NGC 1977 mit einem Radius von 1,0 km/s hat eine Masse von 700 Sonnenmassen und expandiert mit 1,5 km/s. Beide werden gut durch ein analytisches Modell von expandierenden H II-Gebieten beschrieben. Diese ergeben ein Alter von 20.000 Jahren für M43 und ein Alter von 400.000 Jahren für NGC 1977. Das Alter der Schale kann nicht unmittelbar in das Alter des Sterns übersetzt werden, denn junge Sterne können lange in der Molekülwolke eingebettet sein, bevor sie ins

dünne Medium gelangen, wo sie eine Expansion in Gang bringen können.

In Kapitel 5 untersuchen wir, in wie weit die [C II]-Emission des Orionnebels eine Erklärung liefert für [C II]-Beobachtungen von extragalaktischen Quellen. Da die [C II]-Linie die stärkste FIR-Linie ist, kann sie auch in Quellen mit großem Abstand beobachtet werden, und es wurde gezeigt, dass es eine Korrelation zwischen der [C II]-Luminosität und dem Sternentstehungspotential einer Galaxie gibt. Wir untersuchen zunächst die Korrelationen zwischen der [C II]-Intensität und der Staub-70 μm -, PAK-8 μm -, integrierter FIR- sowie CO(2-1)-Intensität ($\lambda = 1,3 \text{ mm}$). Wir sehen gute Korrelationen zwischen der [C II]-Intensität und den ersten drei, wobei diese nicht linear proportional sind, sondern mit einem Exponenten kleiner als 1 gehen. Das Verhältnis zwischen [C II] und CO(2-1) zeigt auch einen Trend, aber auch große Streuung. In extragalaktische Quellen von hoher FIR-Luminosität wird eine verminderte [C II]-Luminosität beobachtet. Wir sehen das auch in unseren Daten: Die [C II]-Intensität nimmt im Verhältnis zur FIR-Intensität mit steigender FIR-Intensität in der Nähe der Trapeziumsterne ab. Wir schreiben dies der Bedeutung von Gaskühlung durch die Sauerstofffeinstrukturlinie [O I] bei 63 μm zu. Ein kleiner Effekt kann auch ein weniger effizienter Heizmechanismus durch zunehmende Ionisation von PAKs und Staubkörnern in der Nähe heißer Sterne sein. Wir sehen jedoch auch ein vermindertes [C II]/FIR-Verhältnis in Sichtlinien mit großen Säulen von Staub, warm oder kalt. Eine mögliche Interpretation der [C II]-FIR-Defizienz wäre dann auch eine Beschreibung als FIR-Überschuss. Wenn wir die [C II]-Luminosität mit dem Sternentstehungspotential des Orionnebels, wie es bekannt ist aus Zählungen von jungen stellaren Objekten, vergleichen, sehen wir, dass die Gleichungen, die auf extragalaktische Beobachtungen ge-
eicht sind, den tatsächlichen stellaren Inhalt unterschätzen, ungefähr um ein bis zwei Größenordnungen. Dies kann anzeigen, dass große Oberflächen, die weniger intensive Strahlung aussenden, wesentlich zur galaktische [C II]-Emission beitragen. Wir sehen einen Trend in dieser Richtung auch in unseren Daten.

Kapitel 6 ist eine Ausführung des PDR-Aspekts, der in Kapitel 5 zugunsten der Übersichtlichkeit und Verständlichkeit unterbelichtet blieb. Zuerst teilen wir das Gebiet der ganzen [C II]-Karte in vier Gebiete auf: Die Schale des Orionnebels, das molekulare Filament um den Moleküllern OMC4 in der Mitte der Schale, M43 und NGC 1977. Die letzten zwei Gebiete werden wiederum aufgeteilt in das H II-Gebiet, dichte molekulare Gebiete und die [C II]-emittierende Schale. Wir sehen eigentlich, dass die Korrelationen, die wir im vorhergehenden Kapitel global untersucht haben ([C II]-Intensität versus Staub-70 μm -, PAK-8 μm - und FIR-Intensität), wenig Variationen in den vier getrennten Gebieten zeigen. Nur die Korrelation zwischen der [C II]-Intensität und der CO(2-1)-Intensität ist komplizierter. Diese untersuchen wir näher, indem wir Spektren in repräsentativen Gebieten studieren. Das zeigt, dass in jeder Emissionslinie mehrere Komponenten vorhanden sind, die nicht immer mit einander in Beziehung zu setzen sind. Möglicherweise werden wir genarrt von der Dynamik, induziert durch die Sterne, der Gebiete. Dies zeigt auch, dass Sternentstehungsgebiete sehr komplex sind, und dass es eigentlich nicht möglich ist, physikalische Eigenschaften aus der Messung einer gemittelten Linie (wie das in extragalaktische Studien der Fall ist) zu bestimmen. Wir sehen auch, dass es durch die Vielheit an Komponenten schwierig ist, die Emission wiederzugeben in PDR-Modellen. Nichtsdestotrotz nähern unsere edge-on-PDR-Modelle die [C II]-Intensität ganz ordentlich, aber wir bemerken, dass es Abweichungen gibt. Zum Schluss relatieren wir die [C II]-Kühlungseffizienz, gemessen als [C II]/FIR-Intensitätsverhältnis, an die aus PAK-Spektren abgeleiteten Charakteristiken der PAKs. Wir sehen jedoch nicht, dass die PAK-Ionisation oder die

Molekülgröße signifikant variiert, wohl aber das [C II]-FIR-Verhältnis. Möglicherweise bedeutet das, dass kleine Staubkörner auch wichtig sind für die Erwärmung des Gases. Hier könnten zukünftige Missionen, wie das *James Webb Space Telescope*, Licht ins Dunkel bringen.

Kurzum, die Beobachtungen, die ich in dieser Arbeit studiert habe, zeigen den Reichtum von Sternentstehungsgebieten. Nicht nur gibt es einen Reichtum an verschiedenen Emissionslinien (die wichtigsten sind [C II], [O I] und die CO-Linien), sondern auch einen Reichtum an Emissionskomponenten, die in jeder Linie wieder verschieden zu sein scheinen. Nichtsdestotrotz können die Expansionsbewegungen auf großer Skala sehr genau bestimmt werden. Dieser Arbeit nachfolgend wird der SOFIA FEEDBACK C⁺ Legacy Survey 11 Sternentstehungsgebiete in der Milchstraße beobachten und das Maß, in dem Sterne ihre Umgebung beeinflussen, mit größerer Genauigkeit als bisher quantifizieren können. Dies wird uns in die Lage versetzen, besser zu verstehen, wie auch viel größere Strukturen in unserem Universum, die wesentlich durch stellare Rückkopplung bestimmt werden, entstehen und vergehen.

