

氏名・(本籍)	かめ や おさむ 亀 谷 収
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 963 号
学位授与の要件	昭和61年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)天文学専攻
学位論文題目	Molecular Line Observations of the NGC7538 Molecular Cloud (NGC7538分子雲の分子輝線観測)
論文審査委員	(主査) 教 授 高 窪 啓 弥 教 授 須 田 和 男 教 授 高 橋 真 一

論 文 目 次

Abstract

Chapter 1. Introduction

Chapter 2. Historical Backgrounds of this Research

2-1. Massive Star Formation

2-2. High-Velocity Flows

2-3. NGC 7538 Region

2-4. Distance to the NGC 7538 Molecular Cloud

Chapter 3. Observations

3-1. HCO^+ Line

3-2. CS, C^{34}S , and CH_3OH Lines

3-3. CO Line

Chapter 4. Global Distribution in the High-Density Core

4 - 1.	Introduction
4 - 2.	The Results of Measurements
4 - 3.	Discussion
4 - 4.	Summary and Conclusions
Chapter 5.	Detailed Structure of the High-Density Core
5 - 1.	Introduction
5 - 2.	The Results of Measurements
5 - 3.	Discussion
5 - 4.	Summary and Conclusions
Chapter 6.	Interface of NGC 7538 HII Region and the Molecular Cloud
6 - 1.	Introduction
6 - 2.	The Results of Measurements
6 - 3.	Discussion
6 - 4.	Summary and Conclusions
Chapter 7.	High-Velocity Flows in the High-Density Core
7 - 1.	Introduction
7 - 2.	The Results of Measurements
7 - 3.	Discussion
7 - 4.	Summary and Conclusions
Chapter 8.	Summary and a Total Image of the High-Density Core
Chapter 9.	Concluding Remarks
Acknowledgements	
Appendix 1. Estimation of CS Column Density	
Appendix 2. LVG Calculations of CS and HCO^+ Lines	
Appendix 3. Population Calculations of CH_3OH Lines	
References	

論文内容要旨

NGC 7538 に付随する分子雲 (図 1 参照) 中には、大質量星生成が起こり、しかも幾つかの高速流を伴う高密度コア領域が存在する。本論文では、6 本の分子輝線を用いた高角分解能観測をこの領域に対して行うことにより、この高密度コア領域の活動性を詳細にしかも統一的に理解することを目的としている。

この領域は、次に述べる点で非常に興味深い。(1) わずか $1.6 \text{ pc} \times 1.2 \text{ pc}$ の大きさの中に 5 つの大質量星生成領域 (IRS 1, IRS 2, IRS 3, IRS 9, IRS 11) が存在し、そのうち IRS 1, IRS 2, IRS 3 は直径 0.4 pc の複合体 (IRS 1-3 コンプレックス) を形成している。(2) IRS 1-3 コンプレックスの北側 0.4 pc には HII 領域 NGC 7538 の電離境界面が存在し、分子雲中へ影響を与えていると思われる。(3) IRS 1 及び IRS 11 に多くの水メーザー源や水酸基メーザー源が存在する。さらに、銀河系内にまだ数例しか見つけられていないホルムアルデヒドメーザー源やメタノールメーザー源が IRS 1 付近に見つけられている。(4) 幾つかの高速流が高密度コア領域内に存在している。この天体ほど多くの高速流を伴う天体はない。

しかしながら、この天体までの距離は 2.7 kpc もあり、有名な星生成領域であるオリオン領域の約 5 倍遠方にあるので、今まで行われていた角分解能 1 分程度の分子輝線観測では、高密度コアの構造や、HII 領域との相互作用による活動領域等を分離し測定することができなかった。この為、この領域の活動性についてはまだよく判っていなかった。

そこで、この分子雲内の各活動領域を分離研究することを目的として野辺山宇宙電波観測所 45 m 電波望遠鏡を用いた高角分解能 ($14'' - 33''$) の観測を行った。用いた分子輝線は、一硫化炭素 ($\text{CS } J=1-0$) 及びその同位体 ($\text{C}^{34}\text{S } J=1-0$)、メタノール ($\text{CH}_3\text{OH } 1_0-0_0 \text{ A}$ 及び E)、一酸化炭素 ($\text{CO } J=1-0$) の各輝線である。さらに高密度コアの拡がり等を調べるために、東京天文台 6 m ミリ波望遠鏡の $2.2'$ 、ビームを用いたホルミルイオン ($\text{HCO}^+ J=1-0$) 輝線観測も行った。

本論文の第一章から第三章にかけては、この分野 (大質量星生成、高速流) のこれまでの進展状況をも含めて、以上の内容を詳しく述べ、以下では、これらの観測の解析結果及び考察を述べる。

第四章では、高密度コア領域の全体的な分布を調べた。 $\text{HCO}^+ (J=1-0)$ 輝線の積分強度の分布は、弱い部分も入れると、HII 領域の南側に高密度コアが $18' \times 10'$ ($14 \text{ pc} \times 6 \text{ pc}$) の拡がりを持つことを示している。この全体的な分布は $\text{CO } (J=1-0)$ 輝線の分布に似ているが高密度コア領域の中心近くでは、むしろ高密度領域のトレーサーである CN や CS 分子輝線の積分強度の分布に似ている。この分布は、 HCO^+ 分子が CO 分子と平衡状態にあることと、 HCO^+ 分子の高密度領域で輝線を強く出す性質から理解できる。また、 $\text{HCO}^+ (J=1-0)$ 輝線のピーク速度の分布図をみると、HII 領域の南西側に HII 領域の輻射によってドライブされた水素分子の解離領域が存在することがわかり、Dickel 達が $^{13}\text{CO } (J=1-0)$ 輝線によって見

出した結果をHCO⁺輝線についても確認したことになる。なお、この領域ではHCO⁺輝線の積分強度がH II領域側で¹³CO分子の柱密度の分布より強調されていることも判明した。

第五章では、高密度コア領域の詳細な構造をCS, C³⁴S, CH₃OH, COの各分子輝線を用いて調べた。CO (J=1-0)分子輝線のピークアンテナ温度よりガスの運動温度の分布を求めると、IRS 1-3コンプレックス, IRS 9, IRS 11の各点で最大値をもち、それらの値は赤外線観測から求めたダストの温度と一致する。この一致は、高密度コア領域中の分子ガスが中心天体からの輻射で熱せられたダストとほぼ熱平衡にあることを示している。

CS (J=1-0)輝線及びC³⁴S (J=1-0)輝線を用いてLVG (Large Velocity Gradient)モデル計算を行って、ガス密度 n(H₂)及びCS分子の相対存在比 X(CS)を求めた。コア領域中でのこれらの値は、 $n(H_2) = 10^{3.7} - 10^{4.5} \text{ cm}^{-3}$, $X(CS) = 10^{-8.6} - 10^{-7.9}$ となった。また、推定される高密度コア領域の質量は $6 \times 10^3 M_{\odot}$ となり、ビリアル質量にはほぼ等しい。

CS (J=1-0)輝線とC³⁴S (J=1-0)輝線の強度比を用いてCS分子の柱密度の分布を求め、このコア領域中に2つの高柱密度領域を見出した。これらの領域は、IRS 11の南東40''(ポジションA)とIRS 1の南東30''(ポジションB)である。ポジションAではCH₃OH (1₀-0₀A)輝線の積分強度も最大値をとる。ここでは、高密度コア領域中で平均密度が最も高い領域であり、密度は $10^{4.5} \text{ cm}^{-3}$ である。一方、ポジションBはC³⁴S (J=1-0)輝線が最も強い領域である。このC³⁴S輝線の強いことは、CS分子の相対存在比が周囲より高いこと又は、ポジションBの内側で外側よりも励起温度が高いことのいずれかの原因で説明できる。いずれにしても、これらの説明は、IRS 1に付随する高速流による影響が高密度コア領域に与えられていることを示唆する。

CH₃OH (1₀-0₀E)輝線の積分強度はIRS 1とIRS 11の間(ポジションE)に最大値をもつ。CH₃OH (1₀-0₀A)輝線との強度比を用いて、光学的さが十分に小さいという仮定のもとにポピュレーションの計算を行うと、ここには充滿率の小さな高密度のクランプまたはシート状の領域があることが判る。これらのクランプ又はシート状領域はIRS 1及びIRS 11の2つの高速流の活動性に関連づけられるであろう。

第六章では、NGC 7538に接する分子雲の領域の状態を示す。CO輝線のピークアンテナ温度の分布から、厚さ0.4-1pcのシェル状構造がこの領域に見出された。この構造は、NGC 7538の光学写真や周波数1.4 GHzの連続波のマップの最低レベルの等高線と良く一致する。さらに、等速度図を見ると、IRS 1の北東側に延びる尾根状構造の位置が速度の変化と共に変化することがわかる。従ってこの領域はH II領域NGC 7538の膨張によるショックを受けている領域であると思われる。これは、この領域にH₂分子の輝線(ショックの存在を示す)が見出されていることによっても裏づけられるものである。さらに、H II領域との境界の数点では、二つのピークを持つCO輝線輪郭があり、これは上記の考え方を支持すると同時に、CO輝線を放射するこの領域が、実際はH II領域を包むように存在していて、しかも外向きに運動していることを示す。

第7章では、¹²CO (J=1-0)輝線及びCS (J=1-0)輝線を用いて高密度コア領域中の

高速流の分布を調べ、4つの高速流がこの領域中に存在することを見出した。このうち3つは、恐らくIRS 1, IRS 9, IRS 11の位置と、その周囲に存在する双極流であろう。残りの高速流はポジションAの位置及びその周囲に見える。この高速流は双極流構造を示さず、しかもその中心には赤外線源が見つけられていない。

IRS 1及びその周囲にある高速流は明瞭な双極流である。位置速度図を見ると、この双極流全域で外向きの加速があることがわかる。この高速流は他の高速流と違って、恒星風で説明することができる。

IRS 9及びその周囲にある高速流は大きさが $1.6 \text{ pc} \times 1.6 \text{ pc}$ で、大きさ、質量、エネルギーが4つの高速流の中で最も大きな流れである。青方偏移した成分はシェル状構造を示し、その中にはWerner 達によって見いだされた赤外反射星雲がある。このIRS 9の高速流は大きさはまったく違うが、R Monの高速流と形状が似ている。

IRS 11及びその周囲にある高速流は速さが 11 km s^{-1} 程度で、高速流の中では比較的ゆっくりした流れであるが、CSウイングはこの領域で最も顕著である。COウイングとCSウイング中の柱密度を比較して、高速流中のCS分子の相対存在比を求めた。その結果、CS分子の相対存在比が通常より3–100倍多くなることがわかった。これは、高速流によるショックによってCS分子が相対存在比の増加を起こしたことを示唆する。

各高速流のドライブ機構を知る為に、各高速流の中心天体の輻射圧と、各高速流をドライブするのに必要な力を比較した。その結果、IRS 9とIRS 11に付随する高速流では、中心天体の輻射圧の数十倍以上の力が高速流のドライブに必要であり、中心星の輻射圧だけではドライブできないことが示された。この結果は、通常の他の高速流についての特徴と一致する。ところが、IRS 1に付随する高速流では、二つの力の比が4倍しかなく、通常の高速流についての値よりはるかに小さい。これは、このIRS 1に付随する高速流だけは、中心星の輻射圧が高速流のドライブに重要な役割を受け持つことを示す。即ち、この高密度コア領域中には2つの違ったタイプの高速流——輻射圧が重要なもの（IRS 1）と重要でないもの（IRS 9, IRS 11）——が存在していることになる。

高速流から高密度コア領域への運動エネルギー供給率を調べると、高速流の力学的時間（ 10^4 年– 10^5 年）の間に高密度コア領域への供給されるエネルギーは、もし、コア中の乱流運動へのエネルギー変換効率が2%より大きければ、コア中の乱流の減衰を補えるだけの量になることが判明した。

第8章に以上で判明した事項を模式図としてまとめた（図2参照）。以上のことから、NGC 7538分子雲中の高密度コア領域の活動性は、4つの高速流の活動性と赤外線とH II領域に近接したショック領域の活動性とが加わったものであることが判明した。従って、NGC 7538領域は、大質量星生成領域の研究上、極めて重要な領域である。

第9章では、この研究の今後の発展方向を述べた。特に、 ^{13}C O輝線等を用いた高速流の物理量の精密な調査や、ディスク構造の探査が極めて重要である。

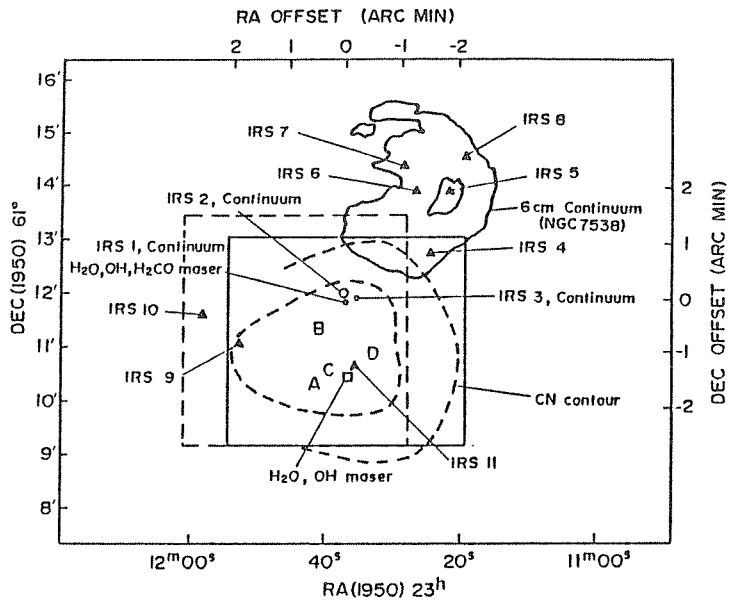


図1 NGC 7538 領域

内ワク (実線) は C S, $C^{34}S$, CH_3OH 輝線の観測領域を示す。内ワク (破線) は CO 輝線の観測領域を示す。

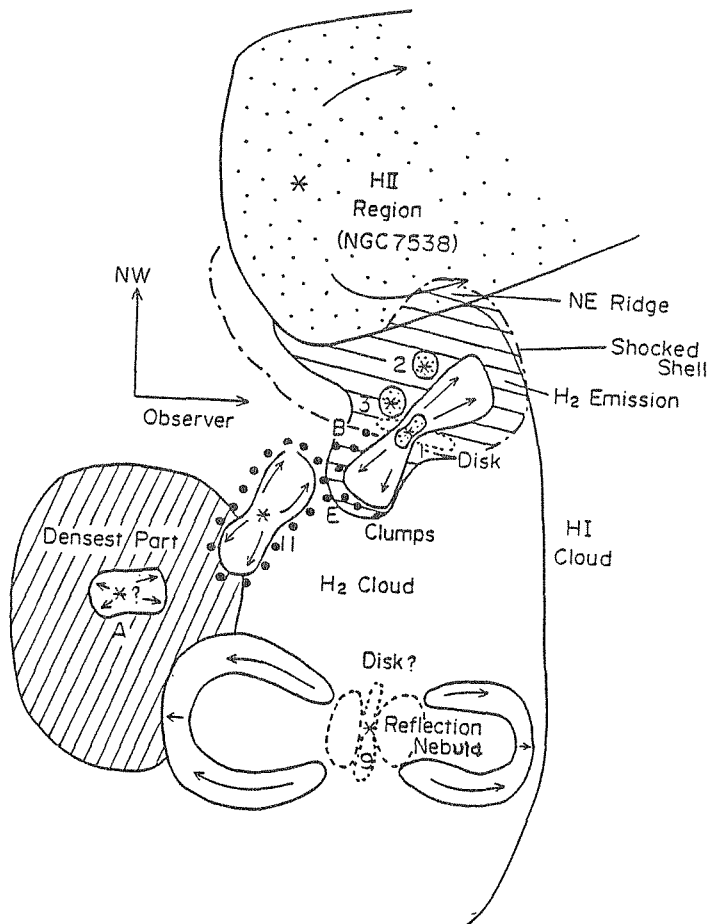


図2. NGC 7538 領域の模式図

IRS 1 を通る北西—南東方向の断面図として示している。

論文審査の結果の要旨

H II 領域 NG 7538 の南側に隣接する分子雲は数個の赤外線源やレーザー源を包含し、大質量星 (O, B 型星) が形成されつつある代表的な雲として知られ、既に多くの分子輝線観測が行われているが、いずれも空間分解能が不十分で、この分子雲中で起きていると思われる種々の現象を分解することができず、より高い分解能での観測が待たれていた。

本論文は、種々の分子の回転準位間遷移によって生ずる輝線を用いて、高空間分解能 (最高 $14''$) の観測を行い、この分子雲、特にその高密度コア領域および H II 領域との接触領域、の内部運動・物理的諸量を決定し、これらについての考察と解釈を行ったものである。

この領域のガス温度は、光学的に厚い CO 輝線の中心強度から見積ることができ、星間塵とはほぼ熱平衡の状態にあるとすることができる。また、CS および $C^{34}S$ 輝線の強度比から高密度コア領域内のガス密度、約 10^4cm^{-3} が推定され、この領域の質量としてはビリアル定理から導かれるものとはほぼ等しい $6 \times 10^3 M_{\odot}$ が得られる。

CO および $C^{34}S$ 輝線の翼部強度の空間分布から、この領域内には少なくとも四つの高速流が認められる。このうちの三つは赤外線源を伴い、いずれも双極流で、大質量星形成直後の周星ガスの典型的な運動を示す。残りの一つの高速流は赤外線源を伴わず、また双極流であるか否かも明らかではない。これが双極流発生以前の段階に対応するかどうかの判定は今後の研究に委ねるとしても、極めて興味ある高速流である。

CH_3OH 輝線が強い方向について、この分子の準位滞在数に関する計算によれば、視線上のガスの分布は一様ではあり得ず、 10^7cm^{-3} 程度の高密度のガス塊 (clumps) が存在するとしなければならない。

H II 領域に接触する領域には CO 輝線強度にシェル状の分布が見られ、これは、NGC 7538 の光学像や、電波の連続スペクトルの分布とよく一致し、高密度領域が H II 領域を包んでいるように見える。また、このシェルには H II 領域から離れるような運動があり、H II 領域の膨張に伴う衝撃波によって圧縮されたガスのシェルであると理解される。

本論文には以上に述べたもののほかにも種々の新知見が述べられており、これは NGC 7538 に隣接する分子雲に関する詳しい描像を与えるとともに、大質量星形成に関する研究に貢献する所が大きい。

以上、本論文は著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、亀谷収提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。