

学位論文題名

The Ammonia Survey Observation of
Massive Star-Forming Region W43 with
Tomakomai Radio Telescope

(苫小牧電波望遠鏡による大質量星形成領域 W43のアンモニア探査観測)

学位論文内容の要旨

恒星は、分子雲中の一部の分子ガスが重力的に収縮して形成されると考えられている。まず、低密度(個数密度にして 10^2 個 cm^{-3} 程度)の分子雲中で分子ガスが放射冷却と、重力的な収縮によって、分子雲コア(個数密度にして 10^4 個 cm^{-3} 以上)が形成される。分子雲コアはさらに重力収縮して内部に光学的に厚く静水圧平衡な領域が形成され原始星が誕生する。原始星周囲の物質は降着円盤を形成しつつ、原始星に落下しやがて星の内部で水素原子の燃焼反応が始まり、恒星が誕生する。大質量星の場合は、表面からの紫外線放射によって周囲のガスなどが炙られて HII(電離水素)領域が形成され、この HII 領域は時間とともに膨張して行く。中心星が寿命を終え、紫外線放射が無くなると HII 領域は冷却され消滅して行く。中心星が超新星爆発を起こした場合には、衝撃波によって周囲の物質が掃き集められ、超新星残骸が残る。以上のように、分子ガスは星形成の過程に密接に関わっている。特に高密度ガスの一部は分子雲コアを形成している。これらの過程は時間的尺度が短い(10^6 年)こともあって、高密度ガスの探査観測は多くはなかった。

本研究では、太陽系から見て Scutum 腕の接線方向に位置する銀河系内の大質量星形成領域である W43 領域(概ね距離 7.3 kpc と推定し、本研究ではこの値を使用)を対象とし、高密度ガスのトレーサーとなるアンモニア分子の反転遷移(J, K)=(1, 1), (2, 2), (3, 3)の 3 輝線を同時に、北海道大学苫小牧 11 m 電波望遠鏡を用いて観測した。この領域には見かけ上 100 pc 程度互いに離れた W43 main と W43S の 2 つの星形成領域が存在する。観測ビームサイズは距離 7.3 kpc では約 10 pc になるため、大きいスケールで星形成を捉えることが可能となる。比較的低密度な分子ガスのトレーサーである $^{13}\text{C}0$ ($J=1-0$)輝線の文献上のデータを基準に 51 点を選び観測した。これらの内、(1, 1)輝線では 22 点、(2, 2)輝線では 7 点、(3, 3)輝線では 6 点で、アンモニア分子輝線を検出した。全観測点を、観測結果、 $^{13}\text{C}0$ ($J=1-0$)輝線の文献データ及び HII 領域の位置を考慮して、8 個の領域に分割した。この内、アンモニア分子輝線を検出したのは、4 領域であった。

太陽系近傍における平均の静止座標系である局所静止座標系に対する視線方向の速度が、90 km/s 以下ではアンモニア分子の主輝線はいずれの観測点でも検出されなかった。7 点において(1, 1)と(2, 2)の積分強度比から回転温度を得ることができ、望遠鏡観測ビーム内における(1, 1)と(2, 2)輝線の

放射領域が等しいと仮定することで、求められた回転温度は 20 K 程度であった。また、5 点において (1, 1)、(2, 2) と (3, 3) の積分強度からアンモニア分子の柱密度、オルソ-アンモニア分子とパラ-アンモニア分子の存在比、アンモニア分子形成時に関係すると考える事ができる温度をそれぞれ得ることができた。望遠鏡観測ビーム内における (1, 1)、(2, 2) と (3, 3) 輝線の放射領域が等しいと仮定することで、求められた柱密度は 10^{14} cm^{-2} のオーダーであり、またアンモニア分子形成温度は 10K 程度であった。(2, 2) 及び (3, 3) 輝線を検出し、回転温度、柱密度等を推定することができた観測点は、いずれも HII 領域が付随し、現在も大質量星が形成されていると考えることのできる W43 main と W43S に対応する 2 個の観測領域であった。

アンモニア分子 (1, 1) 輝線のみが検出された他の 2 領域では、一方には HII 領域および主に分子雲コアの段階にあると考えられている (中間) 赤外線における暗黒星雲 (IRDC) の付随が確認された。今回の文献調査では、星形成に関係する天体の付随は確認できなかった。

遠赤外線の光度は、(大質量) 星からの紫外線を吸収した星間ダスト粒子が遠赤外線の波長域において再放射した量とみなせるので、星形成の指標の 1 つと考えられている。IRAS 衛星の 60 μm と 100 μm バンドの流束密度から求めた遠赤外線の光度、アンモニア分子 (1, 1) 輝線の積分強度と $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線の積分強度の 3 者の間には概ね相関があることが確認された。アンモニア分子 (1, 1) 輝線の積分強度を $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線の積分強度で割った量は分子雲中の高密度ガスの割合に比例しているとみなせる。この量は、W43 main と W43S に対応する 2 個の観測領域の間で大きさが異なる傾向がある事がわかった。

IRAS 衛星の 60 μm と 100 μm バンドの流束密度の比からダストの色温度を求めることができる。この温度と回転温度、アンモニア分子形成温度の 3 者の間には、アンモニア分子形成温度 < 回転温度 < ダスト色温度の関係が認められた。アンモニア分子形成温度は回転温度に比例しているようである事と、星形成効率に比例する量である、遠赤外線の光度を $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線の積分強度で割った量と回転温度に相関が見られないことから、観測されたアンモニア分子雲においては、星形成は早期の段階にあり、スケールも小さく、分子雲間で星形成の進化段階に大きな差がついていないと解釈することが可能である。

以上より、見かけ上 130 pc 程度の観測領域の中に分子雲コア、超コンパクト UC HII 領域、HII 領域といった星形成の様々な段階が主となっている領域が存在することが示唆されている。また、この距離の範囲に 3 つの独立しているとみなせる星形成領域が存在することがわかる。超新星残骸が確認されていない事から、これらは約 10^6 年以内の短い時間的尺度同時に存在している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	藤本	正行
副査	准教授	羽部	朝男
副査	教授	石川	健三
副査	教授	倉本	圭
副査	助教	徂徠	和夫

学位論文題名

The Ammonia Survey Observation of Massive Star-Forming Region W43 with Tomakomai Radio Telescope

(苫小牧電波望遠鏡による大質量星形成領域 W43のアンモニア探査観測)

恒星は星間空間中の低温の分子雲中で形成される。分子雲は数パーセク（1パーセクは約 3×10^{18} cm）から数10パーセクあり、水素分子の個数密度が 10^2 cm⁻³ 程度であるが、恒星になるのはその中にあるコアと呼ばれる領域で大きさは0.1パーセク以下、密度は 10^4 cm⁻³ 以上である。質量が太陽程度以下の恒星については、分子雲コアから恒星が形成される過程について観測・理論の両面からの研究が進んでおり、その描像はかなり固まっているのに対して、質量が大きな恒星の形成過程は未解明な点が多い。また、分子雲全体あるいは銀河系のスケールで、分子雲からどのように恒星が形成されるかということについてもよくわかっていない。

このような状況を踏まえ、本論文は北海道大学の苫小牧 11 m 電波望遠鏡を用いて銀河系内の大質量星形成領域 W43 について、密度の高い分子ガスをトレースするアンモニア分子のスペクトル線の多遷移観測を行い、大質量星形成領域をなす分子雲複合体の個々の分子雲ごとに高密度分子ガスの性質の違いと進化段階の違いを比較したものである。

アンモニア分子の反転遷移スペクトル線は複数の遷移が狭い周波数帯域に存在するために、同時に観測しそのスペクトル線強度を比較することによって高い精度で分子ガスの温度を推定することが可能である。著者らのグループは銀河系内のいろいろな星形成領域についてアンモニア分子スペクトル線 $(J, K) = (1, 1), (2, 2), (3, 3)$ の探査観測を行っており、本論文はその中で W43 と呼ばれる銀河系内でも活発な星形成領域を観測したものである。W43 は地球からの距離がやや遠いため、この観測の空間分解能は1パーセク程度とコアを分解することはできないが、広い領域の探査ができる利点を活かして分子雲複合体全体に渡って高密度分子ガスの性質を調べている点は、これまであまりなされてこなかった切り口である。本論文では、回転温度と呼ばれる励起温度を導出し、遠赤外線衛星のアーカイブデータから導出した星間塵の温度と比較している。その結果は、いずれの観測点においてもダスト温度が40 K 程度であるのに対して、分子ガスの温度は20 K 前後と低くなっており、著しい温度の上昇は見られないというものである。一方で、オルソ-パラ比から推定した温度は興味深い結果となっている。アンモニア分子の反転遷移スペクトル線のうち、 $(J, K) = (3, 3)$ はオルソと呼ばれ、 10^6 年程度の時間尺度ではパラ

と呼ばれる $(J, K) = (1, 1), (2, 2)$ とは異なる分子種としてみなすことができるということが知られている。観測されたスペクトル線の強度比からオルソ-パラの存在比が求められ、さらにアンモニア分子が形成された星間塵表面から蒸発する際の「過去の」分子ガスの温度が推定できる。このアンモニア形成時の温度は10 K前後と求められており、現在の温度よりもさらに低い値となっている。つまり、最近の大質量星形成の結果、分子ガスが温められた可能性を示すものである。

本論文では、一酸化炭素分子スペクトル線 ($^{13}\text{CO } J=1-0$) のアーカイブデータを用いて、密度の低い分子ガスとの比較も行っている。アンモニア分子スペクトル線の強度と ^{13}CO スペクトル線の強度比は分子ガス全体に占める高密度分子ガスの割合の指標となっており、この比と遠赤外線連続光のデータから求めた星形成率との間のよい相関が明らかにされている。この相関自体は、銀河スケールでは知られていたが、分子雲スケールでも同様の関係が成り立つことを示したのは本研究の注目点である。

さらに、文献データを精査し、W 43 領域での電離水素領域や超新星残骸の有無を調べ、複合体全体としては現在の星形成が開始されてから 10^6 年程度しか経過していないこと、にもかかわらず星形成が進んでいる分子雲と進んでいない分子雲が混在していることを示している。W 43 領域が銀河系の棒状構造の先端 (パー・エンド) に位置する可能性があり、銀河スケールでの運動と分子雲の性質や星形成の進捗に言及している点も斬新である。

このように、著者は高密度分子ガスの分布とその温度から、分子雲スケールでの星形成ついて新たな知見を得ており、この研究分野に貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は北海道大学博士 (理学) の学位を授与される資格があるものと認める。