

# 論文の内容の要旨

## Exploring Molecular-Cloud Formation Using the Intensity Anomalies of the OH 18 cm Transition

(OH 18 cm 線の強度異常を用いた分子雲形成の研究)

氏名 海老澤 勇治

星間分子雲は、新しい星が誕生する母体であり、その形成過程を解明することは星および惑星系の多様性を理解する上で非常に重要である。星間分子雲の構造は、そこに含まれる一酸化炭素分子 (CO) の回転遷移輝線の電波観測によって主に調べられてきた。一方で、より密度が低くまだ分子が作られていない原子雲の構造は水素原子 (H) の 21 cm 線の観測によって捉えられてきた。これらの観測結果を比較することで、希薄な原子雲から分子雲への進化の探求が行われている。しかし、近年これらの輝線ではうまくトレースできない領域が存在することが指摘された。これは、分子雲の比較的密度が低い領域では、水素はほとんど水素分子になっているのに対し、CO は比較的強い星間紫外線によって炭素と酸素に光解離されてしまうためである。このように、CO 輝線で観測されない部分は CO-dark ガスと呼ばれ、観測的な研究手段が乏しいため、これまであまり理解が進んでいなかった。このギャップを埋めることは、分子雲形成を総合的に理解するための重要な課題である。本研究では、OH 分子の 18 cm 線の超微細構造線の電波観測によって、このような希薄なガスを調べる新しい研究手法を開拓した。さらに、OH 18 cm 線の強度異常に着目することで、希薄な CO-dark ガスから星形成の場である高密度の分子雲コアまで、広い密度範囲にわたって分子雲をトレースできることを示した。

OH 分子は密度の低い分子雲でも酸素と水素から容易に生成されるため、星間雲に広汎に存在する。図 1 に、OH 分子の回転エネルギー図を示す。OH 18 cm 線は、回転基底状態の 4 つの超微細構造の間の遷移であり、4 本の超微細構造線に分かれている (1612 MHz, 1665 MHz, 1667 MHz, 1720 MHz)。これらのスペクトル線は、星間分子雲だけでなく星形成領域や超新星残骸など様々な領域で観測されており、天体に応じて種々の強度異常を示すことが知られている。強度異常は、水素分子との衝突や星間塵の遠赤外線放射によって励起された OH 分子が基底状態へと脱励起する際に、特定の準位に分子が滞留するために生じるが、天体の物理条件に応じて励起のされ方が異なるため、それに応じて異なる強度異常が現れる。本研究では、ドイツの Effelsberg 100-m 電波望

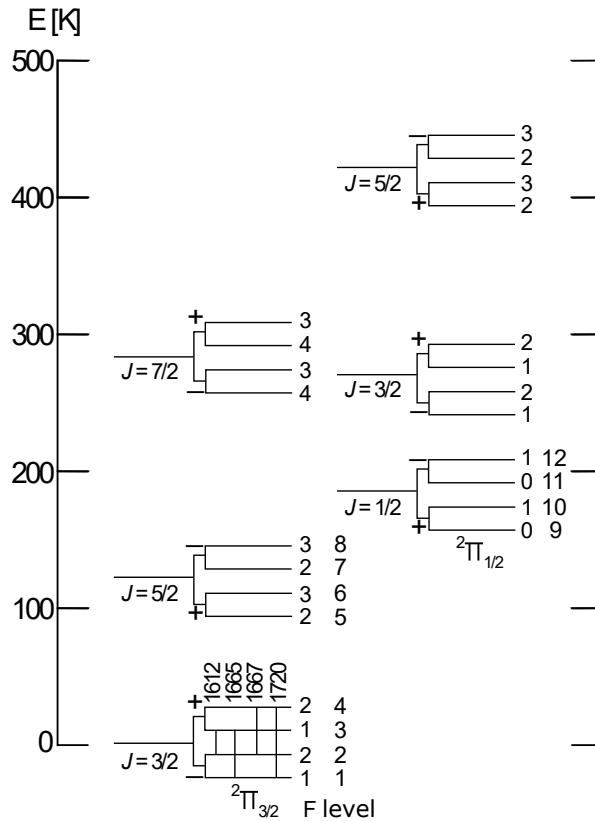


図1 OH分子の回転エネルギー図。各回転エネルギー準位は、ラムダ型二重項と超微細構造によって4つに分裂している。このため、ラムダ型二重項の間の遷移は4つの超微細構造線に分かれる。回転基底状態の場合、1612 MHz, 1665 MHz, 1667 MHz, 1720 MHzの4つの超微細構造線に分かれており、これらをまとめてOH 18 cm線と呼ぶ。

遠鏡、アメリカの Green Bank 100-m 電波望遠鏡を用いて近傍の星間分子雲に対して OH 18 cm 線の観測を行った。その結果、(1) 1612 MHz 線の吸収線、(2) 1665 MHz と 1667 MHz 線の吸収、(3) 1720 MHz 線の吸収線という3種類の強度異常が検出された(図2)。観測天体の背景に強い連続波光源はないため、これらの吸収線は宇宙背景放射に対する吸収線である。(1)と(3)と同様の強度異常は、これまでの研究でもいくつかの星間分子雲に対して報告されているが、これらの起源について定量的な理解はほとんど進んでいなかった。しかし、OH 18 cm 線を分子雲形成の新しい研究手段として確立するためには、これらの本質的な理解が重要である。

そこで、私は独自の統計平衡計算コードを開発し、それを用いてそれぞれの強度異常が起きる物理条件を調べた。特に、TMC-1FN 等で見られる(3)の強度異常を説明するには、遠赤外線放射の影響とスペクトル線の重なり効果を取り入れることが重要であることを示した。その結果、(1) 1612 MHz 線の吸収線は比較的温かいガス ( $T_k > 40$  K)、(2) 1665 MHz 線と 1667 MHz 線の吸収線はより温かいガス ( $T_k > 90$  K)、(3) 1720 MHz 線の吸収線は比較的低温 ( $T_k < 30$  K) で柱密度が大きく ( $N(\text{OH}) > 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) 比較的強い遠赤外線放射の影響を受けるガスをそれぞれ反映していることがわかった。以上の計算結果を実際の観測スペクトルに適用したところ、観測強度を再

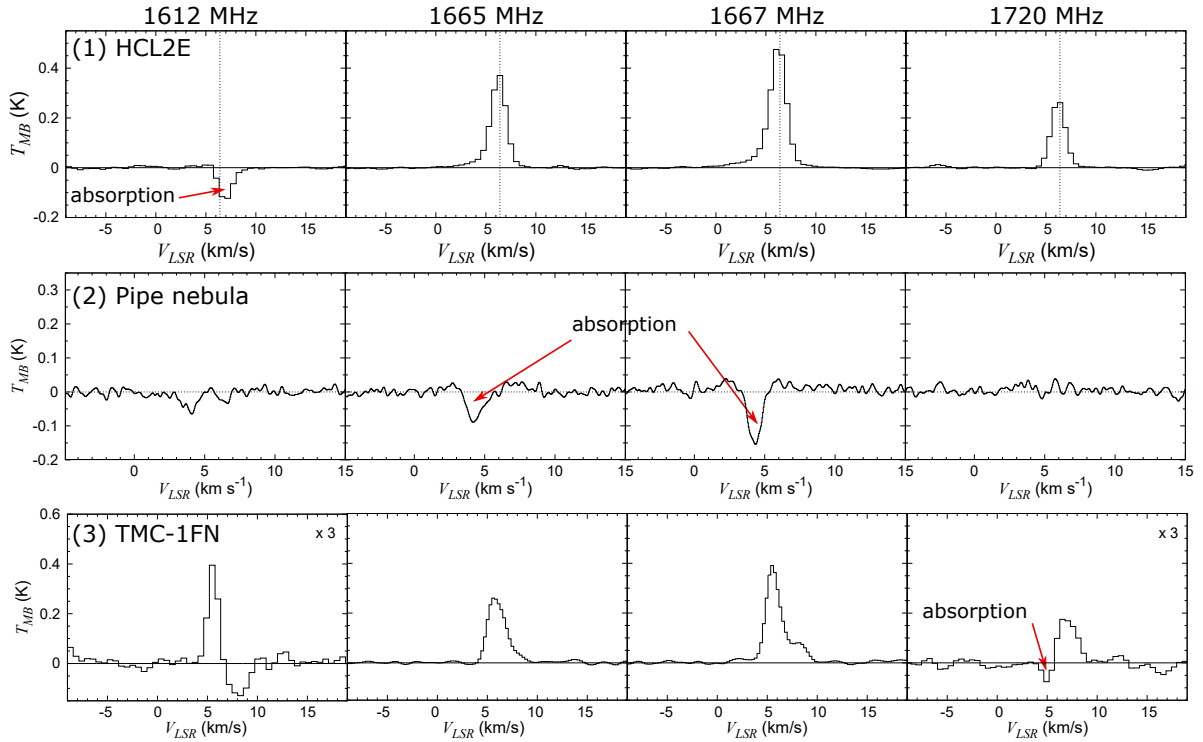


図2 (1)HCL2E, (2)Pipe nebula, (3)TMC-1FN において観測された OH 18 cm 線のスペクトル。それぞれ、(1) 1612 MHz 線, (2) 1665 MHz 線と 1667 MHz 線, (3) 1720 MHz 線が宇宙背景放射に対する吸収線として検出されている。(3) のスペクトルでは、1612 MHz 線の吸収線が 1720 MHz 線の吸収線とは異なる速度成分で検出されている。

現することができた。同時に、(1) と (2) の場合、4 本の超微細構造線の強度から分子雲の温度を精度良く決定できることがわかった。これは、水素分子との衝突による励起レートが温度に依存するため、これらの強度異常が現れている場合、強度が温度に敏感に依存するからである。分子雲の温度は、星間紫外線や分子雲同士の衝突などによる加熱の効果を反映しているため、雲の温度分布からその化学的、物理的な進化を調べることができる。実際に、今回観測を行った HCL2E と L183 において星間紫外線による加熱の効果、へびつかい座分子雲とおおかみ座分子雲において近傍の恒星からの紫外線加熱の影響、Pipe nebula において 2 つの直線構造の衝突による加熱の影響が確認された。また、求められた温度は比較的高く ( $T_k > 40$  K)、これらの領域で OH 18 cm 線は CO が主にトレースする冷たい ( $T_k \sim 10$  K) ガスよりも外側に存在する希薄な分子雲ガス (CO-dark ガス) をトレースしていると考えられる。以上のように、OH 18 cm 線の観測によって CO-dark ガスを捉えるとともに、分子雲の温度を決定できることがわかった。

一方で、電波干渉計 Very Large Array (VLA) を用いた OH 18 cm 線の観測では、TMC-1FN において強度異常は検出されなかった (図 3)。Effelsberg 電波望遠鏡による観測では、この天体においてははっきりとした強度異常 (図 2-(3)) が検出されている。VLA による観測では、TMC-1FN の広がった成分の内側にある、密度の高い分子雲コアが分解されたと考えられる。この解釈は、VLA で観測された OH の強度マップが、比較的密度の高いガスをトレースする  $C^{18}O$  輝線の強度

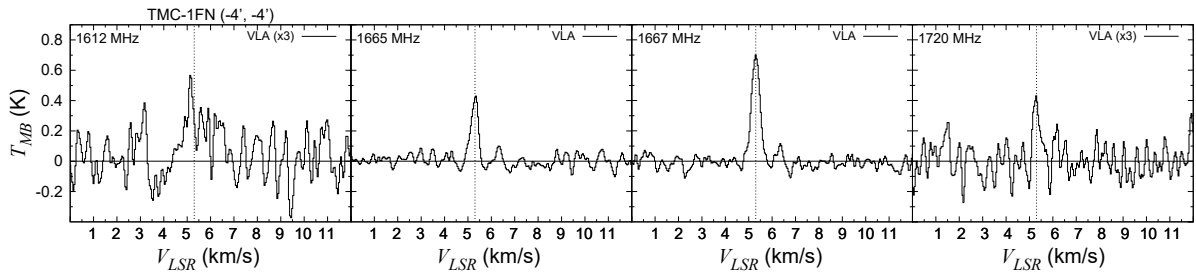


図3 VLA を用いて TMC-1FN において観測された OH 18 cm 線のスペクトル。Effelsberg 電波望遠鏡による観測結果 (図 2-(3)) とは異なり、強度異常は検出されなかった。

分布とよく一致していることから確かめられた。

本研究により、OH 18 cm 線は、単一鏡による観測と干渉計による観測を組み合わせることで、低密度の CO-dark ガスから高密度の分子雲コアまでトレースできることを示した。OH 18 cm 線は、このように広い密度範囲にわたって分子雲を調べることができ、上記のように分子雲の温度計としても利用できるため、今後、Square Kilometre Array (SKA) や Five hundred meter Aperture Spherical Telescope (FAST) などの新しい電波干渉計や単一鏡による観測によって、分子雲形成の理解が進む可能性がある。本研究の成果はその方法論を確立した点で大きな意義がある。