

称号及び氏名 博士（理学） 西村 淳

学位授与の日付 平成 26 年 3 月 31 日

論 文 名 **Observational Study of the Physical Properties of Giant Molecular Clouds by the 1.85-m Millimeter/Sub-millimeter Telescope**
(1.85m 電波望遠鏡による巨大分子雲の物理的性質の観測的研究)

論文審査委員 主査 大西 利和
副査 細越 裕子
副査 田中 智
副査 前澤 裕之
副査 福井 康雄

論 文 要 旨

This thesis is devoted to observational studies of the physical properties of molecular clouds for the better understanding of the star formation process. The cloud properties (e.g., mass, density, temperature) are expected to trace the evolutionary phases of molecular clouds, and thus to reflect the characteristics of the star formation activities. In addition, the properties are also expected to probe the effect of the interaction from the surrounding environment which is supposed to determine the modes of star formation. Hence the investigation of the physical properties of molecular clouds is a key to the understandings of star formation. However, there have been only a small amount of studies with the spatially resolved observations of the clouds properties mainly due to the absence of the appropriate instruments. Therefore, we developed a new millimeter/sub-millimeter radio telescope which is optimized for the large scale surveys of the physical properties of the molecular clouds. In this thesis, we describe the detailed information of the developed telescope and the observational results of a survey toward the Orion molecular clouds.

The telescope is designed to conduct multi-line observations of CO rotational transitions toward nearby molecular clouds. The target frequency is 230 GHz band; simultaneous observations in the J=2-1 rotational lines of carbon monoxide isotopes (^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O) are achieved with a beam size (FWHM) of 2.7'. In order to accomplish the simultaneous observations, we developed waveguide-type sideband-separating SIS mixers to obtain spectra separately in the upper and lower side bands. A Fourier digital spectrometer with a 1 GHz bandwidth with 16384 channels is installed and the bandwidth of each spectrometer is divided into three parts, each of which corresponds to each spectrum, and the IF system has been designed so as to inject these three lines into the spectrometer. A

flexible observation system was created mainly in python on Linux PCs, enabling the effective on-the-fly scan mapping for the large area mapping. The telescope is enclosed in a radome with a membrane covered to prevent a harmful effect of the sunlight, strong wind, and precipitation, minimizing the error in the telescope pointing and stabilizing the receiver and the IF devices. The telescope was installed at the Nobeyama Radio Observatory, and we started the science operations from 2011 January.

Using the 1.85-m telescope, we carried out multi-line CO (J=2-1 of ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O) observations toward the entire area of the Orion A and B giant molecular clouds. The data were compared with the J=1-0 of the ^{12}CO , ^{13}CO , and C^{18}O data taken with the Nagoya 4-m telescope and the NANTEN telescope at the same angular resolution to derive the spatial distributions of the physical properties of the molecular gas. We explore the large velocity gradient formalism to determine the gas density and temperature by using the line combinations of $^{12}\text{CO}(J=2-1)$, $^{13}\text{CO}(J=2-1)$, and $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ assuming uniform velocity gradient and abundance ratio of CO. The derived gas temperature is mostly in the range of 20 to 50 K along the cloud ridge with a temperature gradient depending on the distance from the star forming region. We found the high-temperature region at the cloud edge facing to the H_{II} region, indicating that the molecular gas is interacting with the stellar wind and radiation from the massive stars. The derived gas density is in the range of 500 to 5000 cm^{-3} . The high density regions ($\geq 2000 \text{ cm}^{-3}$) are located toward the cloud edge facing to the H_{II} region, suggesting the compression of the molecular gas by the stellar wind and radiation. In addition, we compared the derived gas properties with the distributions of Young Stellar Objects obtained with the Spitzer telescope to investigate the relationship between the gas properties and the star formation activity therein. We found that the gas density and star formation efficiency are well positively correlated, indicating that stars form effectively in the dense gas region.

The results indicate that the combination of an optically thick line (e.g., $^{12}\text{CO } J=2-1$) and different transitions of optically thin lines (e.g., $^{13}\text{CO } J=2-1$, $^{13}\text{CO } J=1-0$) are important to derive the precise cloud properties. The future study of similar analyses toward the other molecular clouds which have different environment as well as different mode/stage of the star formation would advance our understanding about the mechanism of star formation.

審査結果要旨

恒星は宇宙における最も基本的かつ重要な構成要素である。恒星は様々な天体現象を通してエネルギーを供給し重元素を生成する事で、銀河進化に影響を与える。恒星の特徴（明るさ、大きさ、進化、寿命など）は初期質量によって決まる。すなわち、星の進化はその誕生時に決まり、ひいては銀河の進化過程は星の形成機構によって規定されていると言える。その重要性にも関わらず、星形成とその母体となる分子雲の性質、起源については未だ多くの課題が残されている。

本研究の目的は、分子雲の密度・温度に着目した広域観測を通して、星形成の条件や生まれた星が母体分子雲に与える影響を調べることである。この目的を達成するために、230GHz帯の一酸化炭素分子から放出される電波を観測することのできる口径 1.85m のミリ波・サブミリ波望遠鏡を開発し、それをを用いたオリオン座分子雲の広域観測を実施した。

1.85m 望遠鏡は、存在量の異なる複数の一酸化炭素分子 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$) からの回転量子数 $J=2-1$ 遷移スペクトルを同時に観測することが可能であり、分子雲の密度・温度などの詳細な物理量の広域観測を特長としている。申請者はこのプロジェクトの中心となって、各種コンポーネント・ソフトウェアの開発、コミッショニングを現場で主導し、本格的な天文観測の成功（現在までに約 1000 平方度をカバー）に導いた。そのフレキシブルな観測システムの一部は、SPART 望遠鏡や NANTEN2 望遠鏡にも搭載されている。

本研究では、この 1.85m 望遠鏡を用いて、最も近傍の大質量星形成領域であるオリオン座分子雲の広域観測(55 平方度)を実行した。本観測は分子輝線観測として領域全体を網羅する最も高い分解能による探査であり、 $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}(J=2-1)$ では世界で初めての全域観測である。既存の $J=1-0$ のデータと比較することにより、特に $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ の強度が分子雲の密度・温度に敏感であり、 $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 、 $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ 、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ を組み合わせることにより、その密度・温度を精確に推定することが可能であることを示した。オリオン座分子雲全域で密度・温度分布を明らかにし、電離水素領域に面した分子雲の加熱・圧縮の可能性を示した。また、星形成の効率が環境や密度に依存することを示した。

以上のように本研究では、非常に複雑なシステムである電波望遠鏡を完成に導き、それをを用いた天文観測により、分子ガスの詳細な物理量を明らかにする手法を確立したことは、傑出した成果であり、高く評価できる。また、これらの成果は、ALMA 等での系外銀河の分子雲詳細観測への応用も期待される。

本委員会は本論文を学位論文として十分な内容を有しているものとして判断した。