

氏 名 谷口 琴美

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1985 号

学位授与の日付 平成 30 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Formation Mechanisms of Cyanopolyynes and Chemical  
Evolution in the High-Mass Star-Forming Regions

論文審査委員 主 査 教授 富阪 幸治  
教授 立松 健一  
助教 亀谷 収  
教授 相川 祐理 東京大学 大学院  
理学系研究科  
准教授 酒井 剛 電気通信大学 大学院  
情報理工学研究科

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

It is one of the fundamental subjects in astronomy how stars are formed and evolve. In particular, our understanding of massive star ( $M > 8 M_{\text{sun}}$ ) formation processes is still poor, and even the initial conditions of massive star formation have not been fully revealed yet.

The chemical composition is a good diagnostic tool of the physical conditions and evolutionary stages. Carbon, the fourth abundant element in the Universe, is essential because it is an important composition in various molecules. Approximately 200 molecules have been detected in the interstellar medium and circumstellar shells so far. The interstellar molecules containing carbon abundantly are categorized into two types; unsaturated carbon-chain molecules and saturated complex organic molecules. Carbon-chain molecules exist from the foremost stages of the star-forming regions, and then they are ideal species to study the chemical evolution and the physical conditions in the star-forming regions. However, studies about carbon-chain molecules have been progressed mostly in the low-mass star-forming regions.

In this dissertation, I carried out the radio astronomical observations of carbon-chain molecules in the high-mass star-forming regions applying the similar methods established in the low-mass star-forming regions. I focus on cyanopolyynes series ( $\text{HC}_{2n+1}\text{N}$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

I carried out observations of long cyanopolyynes,  $\text{HC}_5\text{N}$  and  $\text{HC}_7\text{N}$ , toward four massive young stellar objects (MYSOs) using the Robert C. Byrd Green Bank 100 m Telescope and the Nobeyama 45 m radio telescope.  $\text{HC}_5\text{N}$  has been detected from all the four sources, and  $\text{HC}_7\text{N}$  has been detected from three sources. The high-excitation-energy lines ( $E_u/k \sim 100$  K) of  $\text{HC}_5\text{N}$  have been detected with the Nobeyama 45 m telescope. Such high-excitation-energy lines cannot be detected, if  $\text{HC}_5\text{N}$  exists in the cold gas with the gas kinetic temperature of 10 K. The  $\text{HC}_5\text{N}$  fractional abundances in G12.89+0.49 and G16.86-2.16 are comparable to that in L1527, and the  $\text{HC}_5\text{N}$  abundance in G28.28-0.36 is higher than that in L1527 by a factor of 20. A possibility of the chemical differentiation among the hot cores has been discovered; the  $N(\text{HC}_5\text{N})/W(\text{CH}_3\text{OH})$  ratio takes a wide range of values over one order of magnitude.

In order to determine the main formation pathway of  $\text{HC}_3\text{N}$  in G28.28-0.36, where the  $\text{HC}_5\text{N}$  abundance is particularly high, I carried out observations of its  $^{13}\text{C}$  isotopic fractionation using the Nobeyama 45 m radio telescope. The neutral-neutral reaction of  $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CN}$  is proposed as the main formation pathway of  $\text{HC}_3\text{N}$  in G28.28-0.36 from the relative abundance ratios of the three isotopologues. I also carried out observations toward the low-mass star-forming core L1527 and the two low-mass starless cores L1521B and L134N, and compared the results among various sources. The main formation pathways of  $\text{HC}_3\text{N}$  are the reaction of  $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CN}$  in all the cores, except for L134N where the reaction of  $\text{CCH} + \text{HNC}$  is proposed as the main formation pathway. From the chemical network simulation about the starless core phases, the  $\text{CN}/\text{HNC}$  abundance ratio may be a possible factor to cause the difference between L134N and L1521B/TMC-1; the  $\text{CN}$  abundance decreases and the reaction of  $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CN}$  cannot occur efficiently in the later stages of molecular clouds. From this suggestion, I propose that the chemical species evaporated

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

from grain mantles are essential for formation of HC<sub>3</sub>N in G28.28-0.36 and L1527 in order to explain the efficient formation pathway in these star-forming cores.

I carried out imaging observations of cyanopolyynes, HC<sub>3</sub>N, HC<sub>5</sub>N, and HC<sub>7</sub>N, and CH<sub>3</sub>CN, a hot core tracer, toward G28.28-0.36 using the Karl G. Jansky Very Large Array (VLA). The spatial distributions of long cyanopolyynes are consistent with those of CH<sub>3</sub>CN and 450 μm warm dust continuum. These results suggest that long cyanopolyynes exist and are formed at the position of a hot core candidate. In G28.28-0.36, both the WCCC (Warm Carbon Chain Chemistry) mechanism and other efficient formation mechanisms of cyanopolyynes appear to work.

Survey observations were performed in HC<sub>3</sub>N and HC<sub>5</sub>N in the 45 GHz band and N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HC<sub>3</sub>N, CCS, and *cyclic*-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> in the 90 GHz band toward high-mass starless cores (HMSCs) and high-mass protostellar objects (HMPOs) using the Nobeyama 45 m radio telescope. From the survey observations, I investigate the initial chemical composition and the chemical evolution in the high-mass star-forming regions. The  $N(\text{N}_2\text{H}^+)/N(\text{HC}_3\text{N})$  ratio, which is one of the chemical evolutionary indicators established in the low-mass star-forming regions, decreases from HMSCs to HMPOs in the high-mass star-forming regions. The tendency is opposite to that in the low-mass star-forming regions. The higher temperature in the high-mass star-forming regions seems to produce the different tendencies. Molecules evaporated from grain mantles may play essential roles in the high-mass star-forming regions; destruction of N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> by CO and formation of HC<sub>3</sub>N from CH<sub>4</sub> and/or C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>. The HC<sub>3</sub>N column density tends to decrease with increasing the luminosity-to-mass ratio, which is a physical evolutionary indicator, in HMPOs, while the HC<sub>3</sub>N column density has a positive correlation with the gas column density. These results suggest that HC<sub>3</sub>N exists in the dense gas and is destroyed by stellar activities such as the UV radiation.

Through these researches, I have found out that carbon-chain molecules are commonly present in massive star forming regions from prestellar to hot core phases and have demonstrated that carbon-chain molecules are related to evolutionary stages of massive star forming regions. Further, such new insight will be potentially applicable to study on various star-forming regions such as sequential star formation process and galactic scale star formation.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

星形成過程については、太陽質量程度の低質量星の場合に比べ、大質量星に対する研究は、空間分解能不足など観測の困難さ、サンプル数の少なさなどから、その進展は現在でも限定的である。本研究は炭素鎖分子シアノポリイン ( $\text{HC}_3\text{N}$ 、 $\text{HC}_5\text{N}$ 、 $\text{HC}_7\text{N}$ ) の電波観測を通じて、大質量星形成領域のこれらの分子の形成過程、ひいては分子進化について観測的に迫ろうとしたものである。本博士論文の内容はすでに 4 編の筆頭著者論文として査読付き国際学術誌に公表されている。

[1] 出願者は粗い空間分解能 (0.95 分角) のサーベイで  $\text{HC}_5\text{N}$  が観測されている 4 つの天体について、米国電波天文台グリーンバンク望遠鏡(空間分解能 27 秒角)および野辺山 45m 望遠鏡 (空間分解能 37 秒角または 18 秒角) により分子輝線観測を実行した。 $\text{HC}_5\text{N}$  の高い励起エネルギーの回転遷移 ( $E_u/k \sim 63\text{-}100\text{K}$ ) が観測されたことおよび複数輝線の励起解析から、10K 以下の冷たいガスではなく暖かなガスに  $\text{HC}_5\text{N}$  が存在することが示された。また、3 つの天体において  $\text{HC}_7\text{N}$  の回転遷移線を初めて検出した。このうち大質量星が生まれつつある「ホットコア」天体である G28.28 -0.36 で測定された、水素に対する  $\text{HC}_5\text{N}$  の分子存在比で最も大きな値は、比較対象である低質量星形成領域 (L1527) の原始星周辺で観測されたその 5~10 倍に達していることが示された。

[2] 出願者は野辺山 45m 望遠鏡により、この G28.28-0.36 の  $\text{HC}_3\text{N}$  の 3 つの同位体置換体  $\text{H}^{13}\text{CCCN}$  :  $\text{HC}^{13}\text{CCN}$  :  $\text{HCC}^{13}\text{CN}$  の存在比を分子輝線強度より  $1.0 \pm 0.2$  :  $1.00$  :  $1.47 \pm 0.17$  と求め、それが、1:1:x 型であることから、 $\text{HC}_3\text{N}$  の主要な形成過程が、考えられる反応の中で  $\text{C}_2\text{H}_2$  と  $\text{CN}$  の中性分子反応によることを示した。

[3] 出願者は米国電波天文台超大型電波干渉計 (Very Large Array, VLA) を用いて、「ホットコア」天体 G28.28-0.36 内の  $\text{HC}_3\text{N}$ 、 $\text{HC}_5\text{N}$ 、 $\text{HC}_7\text{N}$  の強度分布を調べた。(1) これらのうち励起エネルギーの高い輝線は米国ハワイ大学 JCMT 望遠鏡波長  $450 \mu\text{m}$  連続波で得られた暖かいダスト起源の熱放射のピークに付随していること、(2) 分布が 30 秒角 ( $\text{HC}_3\text{N}$ ) から 10 秒角 ( $\text{HC}_7\text{N}$ ) であることを得た。これらは、暖かいガス内でシアノポリインが形成されていることを示唆している。

[4] 出願者は、大質量星なしコア (17 個) と大質量原始星が付随するコア (35 個) を野辺山 45m 望遠鏡によりサーベイ観測し、星なしコアから原始星への進化で、観測される分子種に変化が見られるかどうかを調べた。(1) 原始星が付随するコアでは  $\text{HC}_3\text{N}$  柱密度はガス柱密度と正の相関を持つが、星なしコアでは無相関であること、(2) 原始星が付随するコアの全輻射光度とコアのガス質量の比 (L/M 比) と  $\text{HC}_3\text{N}$  柱密度が逆相関すること、(3) 進化とともに  $\text{N}_2\text{H}^+/\text{HC}_3\text{N}$  比が減少することなどを見いだした。

観測および理論の先行研究との比較により、星なしコア期にダスト表面反応で形成され原始星形成以降にダスト表層から脱離する  $\text{CH}_4$  や  $\text{C}_2\text{H}_2$  などが材料となり、シアノポリインが形成されると推定した。これはいくつかの低質量星形成領域の原始星周辺で観測されている「暖かい炭素鎖分子形成反応」(Warm Carbon Chain Chemistry)と類似の過程が大質量星形成にあたって、星が生じた初期である原始星およびホットコア天体で働いている可能性を示唆する結果である。

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

結果のとりまとめ、議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に行っていることが認められ、出願者の研究が、今後推進すべき大質量星形成過程の理解、特に物理状態と分子存在量の間を関係を理解するために大きく貢献するものであると認められた。したがって、審査委員全員が博士論文として合格であると判断した。