

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23740146

研究課題名（和文）重水素濃縮度から探る大質量星形成のタイムスケール

研究課題名（英文）Exploring the timescale for high-mass star formation through deuterium fractionation ratios

研究代表者

酒井 剛 (SAKAI TAKESHI)

東京大学・大学院理学系研究科・特任助教

研究者番号：20469604

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、ミリ波帯の分子輝線観測によって、分子雲クラump形成から大質量星形成に至るタイムスケールを観測的に明らかにすることである。野辺山 45m 望遠鏡を用いた観測の結果、大質量分子雲クラumpの重水素濃縮度(DNC/HNC)は小質量星のそれに比べ有為に低いことがわかった。さらに、モデル計算との比較を行った結果、大質量星なしコアのタイムスケールは several 10^4 年以下であることがわかった。また、赤外線観測では同じような進化段階に見える天体でも、重水素濃縮度の異なる天体があることもわかった。このことは、初期状態の違いを反映していると考えられる。さらに、単一鏡の観測で重水素濃縮度が最も低かった天体を ALMA を用いて観測した結果、天体内部では既に小質量星の形成が活発に起きていることがわかった。このことは、小質量星は大質量分子雲クラumpの形成のかなり初期に内部で生まれることを示唆している。

研究成果の概要（英文）：

We have investigated the timescale of high-mass starless core phase from the deuterium fractionation ratios in massive clumps. We have observed the HNC and HN^{13}C lines toward the massive clumps, including infrared dark clouds (IRDCs) and high-mass protostellar objects (HMPOs), with the Nobeyama Radio Observatory 45 m telescope. We have found that the DNC/HNC ratio of the massive clumps is lower than that of the low-mass cores. This suggests that the timescale of high-mass starless phase is shorter than that of low-mass starless phase. By comparing with the model calculations, we have found that the timescale of high-mass starless phase is shorter than several times 10^4 yr.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：電波天文、分子雲、星形成、大質量星、重水素、星間分子、ミリ波

1. 研究開始当初の背景

大質量星は、強力な紫外線輻射や星風などによって星間空間に莫大なエネルギーを放出し、周囲の星形成に大きな影響を与える。また、超新星爆発によって多くの重元素を星間空間にまき散らし、銀河内の物質循環に重要な役割を果たしている。しかし、そのよう

な重要な役割を果たしている大質量星の形成過程や形成条件は、これまでに観測的にあまり明らかにされていない(e.g. Zinneker & Yorke, 2007, ARA&A, 45, 481)。本研究では、大質量星の母体となる分子雲クラumpが形成され、そこで大質量星が形成されるまでのタイムスケールを観測的に見積もる。大質量

星が形成されるタイムスケールを理解することは、銀河の進化を考える上でも非常に本質的な問題であるが、これまでに観測的検証はほとんどなされていない。

一方で、小質量星については、分子雲コアが形成され星形成に至るまでのタイムスケールについて、観測的な見積もりが行われている。星なしコア（星が出来ていない分子雲コア）と星ありコアの数を比較するという統計的手法によって、 $\sim 4 \times 10^5$ yr 程度と見積もられている (Onishi et al. 2002, ApJ, 575, 950)。現在、大質量星の星なしコア候補天体が見つかってきており (e.g. Sridharan et al. 2005, ApJ, 534, L54; Rathborne et al. 2006, ApJ, 641, 389)、それらと大質量星形成中のコアとの数の比較からタイムスケールを見積もることもできる。しかし、大質量星の星なしコアのタイムスケールを考える上で、上記の統計的な手法を用いるには大きな問題がある。それは、大質量星の形成条件が明白ではないため、そこで本当に大質量星が形成されるのか明らかではないということである。多くの大質量星なしコア候補天体は質量が小さく、そのようなコアは小中質量星形成領域である可能性が高い。本研究では、分子の重水素濃縮度を明らかにすることで、この問題を克服し、大質量星形成のタイムスケールに迫る。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大質量星の母体となる大質量分子雲クランプの重水素濃縮度を明らかにし、大質量星形成前の低温な星なしコアのタイムスケールを明らかにすることである。

分子雲中に存在する分子では重水素濃縮が起きていることが知られている。これは H_3^+ 分子が以下の反応によって、重水素化されることに起因する： $H_3^+ + HD \rightarrow H_2D^+ + H_2 + 230$ K。この反応は発熱反応であるため、低温の分子雲では逆反応が起こらず、 H_3^+ の重水素化が進む。 H_3^+ 分子は様々な分子の形成に関与しているため、分子の重水素化濃縮度も大きくなる。さらに、温度 10 K 程度の低温領域では CO がダストに吸着され、 $H_3^+ + CO \rightarrow HCO^+ + H_2$ といった反応が起こらなくなり、 H_3^+ の寿命が延びる。したがって、低温領域では重水素濃縮が時間とともによりいっそう進むことになる。一方で、分子雲コア内部で星が形成され、周囲のダストやガスが加熱されると、温度上昇によって重水素濃縮度が解消される。この解消のタイムスケールは、分子によって異なる。 N_2D^+ などのイオン分子の重水素濃縮度は、CO や e⁻ などとの反応によって 100 yr 程度で解消される。しかし、DNC などの中性分子は、CO や e⁻ と反応せず、比較的存在量の少ない HCO^+ や H_3^+ などと反応するため、重水素濃

縮度は 10^5 yr 程度かけて徐々に解消されていく。したがって、現在星形成が起こっている領域を観測したとしても、中性分子の重水素濃縮度は星形成以前の情報を維持していると考えることができる。つまり、星なしコアの温度 10 K 程度の期間が長ければ重水素濃縮度は高くなり、星なしコアの期間が短ければ低くなる。したがって、中性分子の重水素濃縮度から、時間を遡って星なしコア時代のタイムスケールを知ることができると期待される。この手法の大きな利点は、すでに大質量星が形成されている天体を観測するため、確実に大質量星形成についての情報が得られるということである。

3. 研究の方法

大質量クランプが形成され、大質量星形成にいたるまでの時間を観測的に明らかにするため、ボロメータレイの観測で見つかった大質量クランプ (Beuther et al. 2002, ApJ, 566, 945; Rathborne et al. 2006, ApJ, 641, 389) に対して分子輝線観測を行う。観測を行う天体は、これまでに我々がサーベイ観測を行ってきた 60 天体 (Sakai et al. 2008, ApJ, 678, 1049; 2010, 714, 1658) の中から選ぶ。これらの天体は、本研究によって得られるデータのみでなく、既にいくつかの他の分子輝線のデータも存在するため、モデル計算との比較を行う上で有利である。観測対象は、具体的には、High-mass protostellar object (HMPO) と呼ばれる比較的若い大質量星形成天体と、さらに若いと予想される Infrared dark cloud (IRDC) である。さらに、観測結果をモデル計算と比較し、大質量星の星なしコアのタイムスケールを定量的に見積もる。

観測する分子は DNC、 $HN^{13}C$ 、 N_2D^+ 、 N_2H^+ などである。まず、70 GHz 帯の $J=1-0$ 輝線の観測を行う。そのために、我々が開発した、野辺山 45m 望遠鏡の 70 GHz 帯受信機を用いる。70 GHz 帯受信機が搭載された大型望遠鏡は世界的に見てもあまりなく、この受信機を用いる事で独自の成果をあげることができる。また、これらの分子輝線は 1 回の周波数設定で観測可能である。

さらに、それら分子の $J=2-1$ 輝線を観測するための受信機の開発も同時に行う。 $J=2-1$ 輝線は 140 GHz 帯にある。野辺山 45m 望遠鏡用の 140 GHz 帯受信機の開発を行う。 $J=2-1$ 輝線も観測することで、放射領域の温度などの情報を得る事ができる。

上記の野辺山 45m 望遠鏡の観測で得られた知見をもとに、ALMA 初期運用フェイズのプロポーザルを出し、ALMA を用いた高分解能観測を行う。これによって大質量分子雲クランプ内部の構造を分解し、重水素濃縮度が内部でどのようになっているのか、内部の星

形成活動との関係などを調べる。

4. 研究成果

(1) 野辺山 45m 望遠鏡による大質量分子雲クラumpの重水素濃縮度のサーベイ観測

野辺山 45m 望遠鏡を用い、IRDC と HMPO に対して、DNC、 HN^{13}C 輝線のサーベイ観測を行った。その結果、下図のように大質量分子雲クラumpの重水素濃縮度は小質量分子雲コアのそれに比べ有為に低いことがわかった。モデル計算との比較から、大質量星形成前の低温な期間は $\text{several} \times 10^4$ 年以下であり、小質量星のそれに比べ明らかに短いことが示唆された。

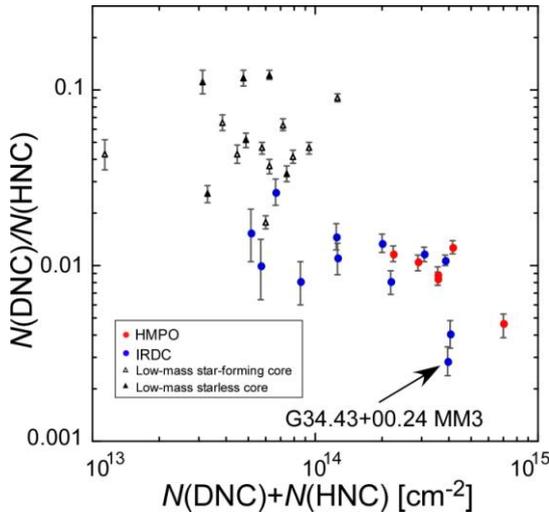


図 1. 大質量分子雲クラumpの DNC/HNC 比と小質量分子雲コアの DNC/HNC 比の比較。

さらに、赤外線観測では同じような進化段階にあると思われる天体であっても、異なる重水素濃縮度を持つことがわかった。重水素濃縮度が初期状態を反映しているとすれば、この違いを生み出す要因として、星なしコア時代のタイムスケールの違いや温度環境の違いなどが考えられる。今後、この違いを生み出す要因を探る事は非常に興味深い。

また、 $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ 比と DNC/HNC 比の比較を行った結果、 $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ 比と DNC/HNC 比は、異なる振る舞いをする事がわかった。 $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ 比は明るい赤外線源を伴う天体で、明るい赤外線源を伴わない天体に比べ、有為に低くなるが、DNC/HNC 比は、明るい赤外線源の有無で大きく変化しない。この結果は、モデル計算から予測される結果と同じである。

(2) ALMA による Infrared Dark Cloud の詳細観測

上記の野辺山 45m 望遠鏡の観測から、重水素濃縮度が最も低い天体 (G34.43+00.24 MM3) を選び、ALMA による高分解能観測を行った。その結果、分子雲クラump内部では、既に

小質量星の形成が活発に起こっており、若いと思われていた天体でも、既に活発な星形成活動を経験していることが明らかになった。このことは、大質量分子雲クラump形成のごく初期に小質量星が形成され、内部で低温な星なしコアが形成される期間は短いことを示唆している。重水素濃縮度が低い要因は、小質量星による加熱が原因の可能性もある。今後、重水素濃縮度が比較的高いものなど、より多くの天体を観測し統計的な議論を行いたいと考えている。

(3) 野辺山 45m 望遠鏡用 140 GHz 帯受信機の開発

野辺山 45m 望遠鏡用 140 GHz 帯 2SB 受信機の開発を行った。光学系は、45m 望遠鏡の鏡面精度やポインティング精度などの問題から、鏡面全体を使わず、アンダーイルミネーション (副鏡でのエッジレベルを -35 dB) とし、144 GHz でのビームサイズが 100 GHz と同じになるようにした。また、ALMA Band 4 用に開発された既存のコルゲートホーンを使用できるように設計し、楕円鏡一つを新たに製作するのみで、光学系を実現した。

受信機デューワーは、野辺山ミリ波干渉計で使用されていたものを 140 GHz 帯受信機用に改造した。4 K ステージなど内部はそのまま使用し、側面板の窓やコネクタポートなどを新しく追加した。また、ローカル用の導波管ポートは W バンドのものを使用し、100 GHz 帯、70 GHz 帯受信機としても使用できるように拡張性を持たせた。2 SB ユニット、OMT は ALMA Band 4 で開発されたものを使用し、IF ハイブリッドは既存のものを用いた。これらを組み上げ、受信機自体を完成させることができた。望遠鏡での搭載は今後行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Sakai, T., Sakai, N., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., Yamamoto, S., “DNC/HNC Ratio of Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-mass Star Formation”, *The Astrophysical Journal*, Volume 747, id 140 (2012), 査読有り

[学会発表] (計 5 件)

① 酒井剛、“野辺山 45m 望遠鏡用 70 GHz 帯受信機の搭載と 140 GHz 帯受信機の開発”、第 13 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、名古屋、2013/2/27-2/28

② Sakai, T., Sakai, N., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., Yamamoto, S., “Chemical Compositions of Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-Mass Star Formation”, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era, Hakone, Japan, 2012/12/3-12/8

③ 酒井剛、“野辺山 45m 望遠鏡用 70GHz 帯 140GHz 帯受信機について”、第 12 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、大阪、2011/11/19

④ 酒井剛、柴田大輝、渡辺祥正、坂井南美、山本智、河野孝太郎、藤井由美、野口卓、浅山信一郎、中島拓、廣田朋也、高野秀路、木村公洋、前澤裕之、“野辺山 45m 望遠鏡用 70 GHz 帯受信機の開発”、日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島、2011/9/19-9/22

⑤ Sakai, T., Sakai, N., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., Yamamoto, S., “Deuterium Fractionation in Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-Mass Star Formation”, The Molecular Universe, Toledo, Spain, 2011/5/30-6/3

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 剛 (SAKAI TAKESHI)

東京大学・理学系研究科・特任助教

研究者番号：20469604

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし