

1 分野 A

1.1 山本研究室

【星・惑星系形成】

恒星および惑星系の形成は、宇宙における最も基本的な構造形成過程の1つであり、観測・理論両面から活発な研究が行われている。また、我々の太陽系の起源、生命の起源に直結するテーマでもある。本研究室では、特に太陽系近傍における星・惑星系形成とそこでの物質進化を、電波観測によって研究している。

新しい星は、星間ガスが自己重力で収縮して形成される。星間ガスの集まり（星間雲）の中で最も密度が高いものが星間分子雲で、新しい恒星と惑星系が形成される現場である。星間分子雲の主成分は水素分子であるが、様々な原子・分子も僅かに存在している。これまでの研究で、それらの組成は星間分子雲の物理進化の歴史を克明に記憶していることがわかってきた。即ち、微量分子の組成から、現在の物理状態だけでなく、「過去」を辿ることができる。本研究室では、このような独自の視点を軸に、星・惑星系形成過程を多面的に研究している。

【なぜ電波か】

星間分子雲の温度はおよそ 10 K 程度である。この「宇宙の中でも最も低温の天体」は、最もエネルギーの低い電磁波である「電波」のみを放射する。しかも、電波は光などに比べて星間物質による吸収散乱を受けにくく、透過力が高い。そのため、星間分子雲の奥深くで起こる星形成の核心部分を見通すことができる。また、電波領域には原子・分子のスペクトル線が多数存在し、それらの観測で星間分子雲の運動や分子組成がわかる。

【ALMA（アルマ）による観測】

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) は、日本、北米、欧州の共同で、チリの標高 5000 m のアタカマ高原に建設された、12 m アンテナ 54 台と 7 m アンテナ 12 台からなる巨大電波干渉計である。2011 年 10 月から運用が始まっており、我々のグループはこれを積極的に活用し研究を進めている。ALMA はこれまでの観測装置よりも 2 桁高い感度と解像度を実現し、星・惑星系形成の理解を大いに進展させつつある。

1.1.1 星形成の観測研究

原始星円盤から原始惑星系円盤への物質進化の理解は、近年急速に進みつつある。その重要な結果の一つは、低質量星近傍の分子組成が天体ごとに顕著

に違うことがわかった点である。その一つの典型は、 HCOOCH_3 などの大型飽和有機分子が原始星近傍の 100 AU 程度の領域に豊富に見られる天体で、ホットコリノ天体と呼ばれる（へびつかい座の IRAS16293–2422 など）。もう一つの典型は、炭素鎖分子などの不飽和有機分子が異常に豊富な天体（おうし座の L1527、おおかみ座の IRAS15398–3359）で、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) 天体と呼ばれる。このような分子組成の違いの原因は、母体となる分子雲の収縮時間の違いによると考えられ、星形成研究においても注目され始めている。

さらに重要なことは、このような分子組成の違いがどのように惑星系へ伝播されるかである。この点についても、ALMA を用いた本研究室の研究により理解が大きく進みつつある。角運動量を保ちつつ回転落下するガスは、遠心力バリア（近日点）より内側には入り込めないため、その近傍で後から落下するガスと衝突して弱い降着衝撃波が発生する。その様子が実際に ALMA で捉えられつつある。さらに遠心力バリア近傍を境として、ガスの分子組成が劇的に変化することが明らかになってきている。このことを利用すると、分子組成を特定の物理状態をハイライトする「マーカー」として利用できる。これらの成果は、原始惑星系円盤への物質進化を理解する上で非常に重要な一歩であり、これらの点を中心に、星・惑星系形成に関する幅広い研究を展開している。

特に、2018 年に、本研究グループが中心（山本が PI）となり、仏、伊、独、米などの研究者と共同して提案していた、FAUST (Fifty AU Study of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars) という ALMA 大型観測プログラムが採択され、観測が進行中である。FAUST は 13 個の太陽型原始星に対して、同一の感度、同一の実空間分解能 (50 au)、および同一の分子輝線で観測することにより、それらの物理構造と化学組成の特徴の全貌を明らかにしようとするものである。系統的に観測を遂行することにより、星・惑星系形成における物理・化学進化の全容を明らかにできると期待される。

星間分子雲から惑星系への物質進化

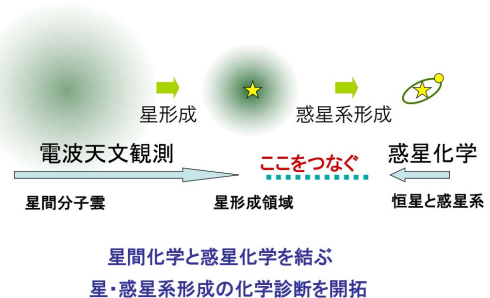


図 1.1.1: A schematic illustration of our goal

【低質量原始星天体 IRAS 16293–2422 の詳細構造】

IRAS 16293–2422 は、へびつかい座にある連星系である。ALMA データの解析から、連星系を成す 2 つ

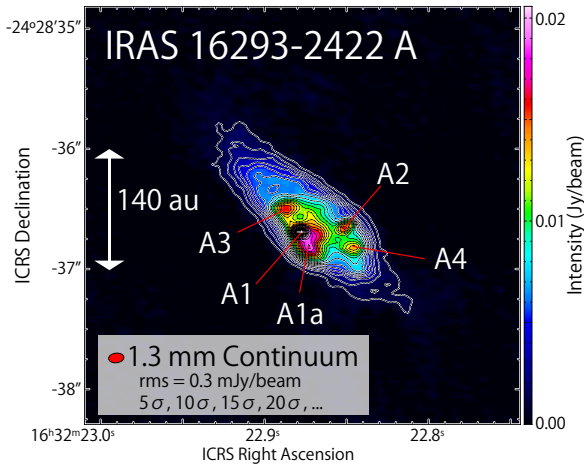


図 1.1.2: 1.3 mm dust continuum emission in IRAS 16293-2422 Source A observed with ALMA. Five intensity peaks are resolved. At least two intensity peaks (A1 and A2) are regarded as protostars constituting the close multiple system Source A.

の低質量原始星のうちの1つ (Source A) が、さらに非常に近接した連星系から成ることがわかった。加えて、Source A を取り巻く分子ガスの運動を解析することで、Source A 全体を取り巻いて回転するエンベロープガスと、連星系を成す原始星 A1 を中心に回転する円盤成分があることが示唆された。また、A1 に付随する円盤成分の周囲でガスの温度が局所的に上昇している様子が見られた。この要因としては、周囲から落下してきたガスが回転する円盤に衝突することによる加熱や、複雑な立体構造のガスが原始星 (A1) からの照射を受けることによる加熱などが考えられる。温度が上昇する位置を境に、ガスの化学組成が急変する様子も見られており、この位置は物理的・化学的な遷移領域になっていると考えられる。

【低質量原始星天体のエンベロープ・アウトフローモデル】

近年の ALMA 観測により、原始星を取り巻くエンベロープガスと回転円盤構造を解像することが可能になってきた。観測されたガスの構造と運動を理解し、原始星質量やガスの比角運動量などの基本的な性質を抽出するには、単純化された運動モデルと比較することが有用である。回転支持円盤の解析には、ケプラー回転のモデルが従来よく用いられてきた。一方で、円盤形成の母体となるエンベロープガスの運動は、比角運動量の保存を仮定した弾道軌道でよく表されることが明らかになってきた。また、落下するエンベロープガスから回転円盤を形成するには、ガスの比角運動量を抜き取る機構が必要である。この機構の一つとしてアウトフローが考えられており、その構造は、単純な放物面型のモデルで近似されることが報告されてきた。円盤の形成過程に迫るには、ガスの比角運動量の輸送に着目し、円盤・エンベロー

プ構造とアウトフローの構造を併せて理解することが不可欠である。本研究では、エンベロープ、回転支持円盤、アウトフローのそれぞれのモデルについて、観測結果との対応を意識して、系統的なシミュレーションを行った。

【孤立した星形成領域：CB68】

へびつかい座にある Class 0 低質量原始星天体 CB68 について ALMA によって高感度・高分解能観測を行った。その結果、代表的な孤立天体 B335 と同様に、Hot Corino 化学 (飽和有機分子が豊富) と WCCC (不飽和有機分子が豊富) を併せ持つハイブリッド型の化学組成をもつことを明らかにした。両者は空間的に分離しており、Hot Corino 化学が原始星近傍の内側に集中して見られ、WCCC が外側 1000 au 程度まで広がって見られる点は B335 と共通している。ところが、Hot Corino 化学の特徴である飽和有機分子は B335 と比べて組成が異なり、その存在量も全般的に1桁程度少ない。物理構造に関しては、この天体のエンベロープでも小さな回転構造が検出された。この回転構造も回転落下運動モデルで説明され、遠心力バリアの上限値は B335 と同様にこれまで知られていた孤立領域以外の原始星のものよりも小さいことが示された。(この結果は ALMA 大型プログラム FAUST のデータを用いたものである。)

【孤立した星形成領域：CB244】

ケフェウス座にある Class 0 低質量原始星天体 CB244 についてミリ波干渉計 NOEMA によって観測したところ、この天体では WCCC の化学組成の特徴のみが検出された。観測ノイズによる検出限界から推定した飽和有機分子の存在量の上限は B335 のものより2桁程度低く、Hot Corino 化学は B335 や CB68 のように明確には見られなかった。また、この天体の物理構造はこれまで観測してきた B335 と CB68 の孤立天体とは異なる。エンベロープの回転構造は、回転落下運動で説明できるが、その遠心力バリアの半径の上限値は B335 や CB68 に比べて1桁以上大きいことがわかった。さらに、エンベロープでは、ガスの分布に偏りがある様子が捉えられた。そのような場合にも、モデルと観測結果の一致度を定量的に判断する方法を開発し、実際に適用した (図参照)。

【Principal Component Analysis (PCA) を用いた原始星周りの化学組成分布の解析】

IRAS 15398-3359 は、おおかみ座にある Class 0 原始星で、数 1000 au のスケールで不飽和炭素鎖分子に恵まれる WCCC 天体として知られる。ALMA を用いて $0.2'' - 0.5''$ (40 au-80 au) の分解能で観測した結果、SO, CCH, CS, $c\text{-C}_3\text{H}_2$, CH_3OH , H_2CO , DCN など、多数の分子輝線が見られた。これらの分子輝線と連続波に対して、アウトフローを含む数 1000 au スケールと原始星付近数 100 au スケールという2つのスケールで主成分分析を行った。狭い範囲で行なった PCA では、分子輝線が2番目の主成分 (PC2) によって、エンベロープ全体に広がる分布と原始星に集中する分布に分類される。また、PC2 の値が増加するに連れて H_2CO の量子数が変化する傾向が見られた。このように、PCA は分子分布の特徴を先入観なく捉える方法として有効であることがわかった。

【低質量原始星 IRAS 15398-3359 周りの物理・化

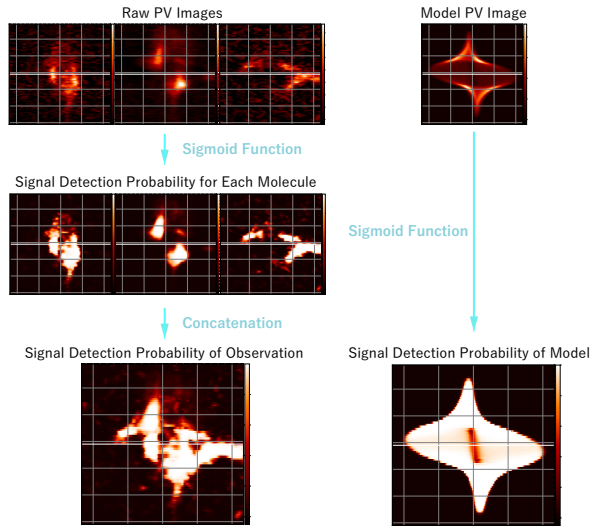


図 1.1.3: The schematic illustration of the procedure to estimate the similarity between the observed kinematic structure and the simulated kinematic structure by a ballistic-model.

学構造]

IRAS 15398-3359 は、Class 0 低質量原始星で、その原始星質量は $0.007^{+0.004}_{-0.003}$ 倍と非常に小さいにもかかわらず、すでに回転する円盤構造が形成されている。ALMA の 12m Array と ACA を用いて数 50au~数 1000 au に渡った広い範囲での物理・化学構造を調べた。原始星から南東方向に 2000 au 程度離れた位置にシェルのような広がった分布が、SiO、SO、CH₃OH、H₂CO で見られた。SiO、SO、CH₃OH は shocked tracer として知られる。そのため、このシェル構造は shocked region である可能性が考えられる。また、SO では原始星から北西方向に 1000 au 程度離れた位置にも分布が見られ、H₂CO では原始星からこれらの分布に向かって伸びる構造が見られた。これらの構造は全て、これまで報告されているアウトフローと垂直な方向に広がる第二のアウトフローとして解釈できる。この新しい構造はこれまで全く知られていなかったものであり、その起源についての検討が進行中である。(この結果は ALMA 大型プログラム FAUST のデータを用いたものである。)

【L483 のアウトフローの構造】

低質量原始星 L483 のアウトフローの構造を ALMA による CS(J= 5-4) 輝線の観測で調べた。アウトフローが回転しながら放出されている場合、エンベロップガスの原始星への降着を促すことができるため、アウトフローの回転運動は注目されている。近年の観測技術の向上により、いくつかの原始星で回転運動が確認されている。L483 では、原始星から 1000 au ほど離れた領域でアウトフローの回転運動が報告されている。そこで本研究では原始星から 100 au 程度離れた領域でアウトフローの回転運動について調べた。その結果、原始星からの距離によりアウトフローの向きが異なっていることが明らかになった。これは

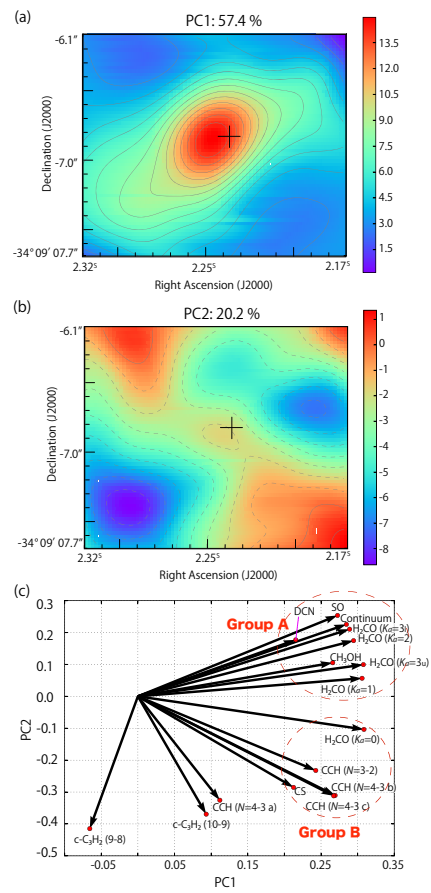


図 1.1.4: (a, b) Two major principal components PC1 and PC2. (c) The plot of the principal components for each distribution on the PC1-PC2 plane

周囲のガスとの相互作用やアウトフロー軸の歳差運動が原因と考えられる。また、アウトフローの形状は原始星近傍で急速に広がり、その後、コリメートしていることがわかった。そのため、アウトフローの形状を記述するのに従来よく使われている放物面モデルよりも 4 次関数で表すモデルがよく観測を説明することを示した (Figure 5)。さらに、アウトフローの回転も確かめられ、エンベロップガスと同程度の比角運動量を持っていることを確認できた。

【NGC2264 CMM3 の化学組成と物理構造】

CMM3 は太陽系近傍 (738pc) の大質量星形成領域 NGC2264 に存在する天体である。この天体は 2 つの原始星 CMM3A と CMM3B からなる連星系であり、このうち CMM3A は非常に多くの有機分子輝線が観測されるホットコア天体として知られている。この有機分子輝線を分解能 0.7" 程度の ALMA データを用いて解析したところ、光学的に薄い LTE (Local Thermodynamic Equilibrium) を仮定した解析では観測結果を説明できなかった。そこで、光学的厚さを

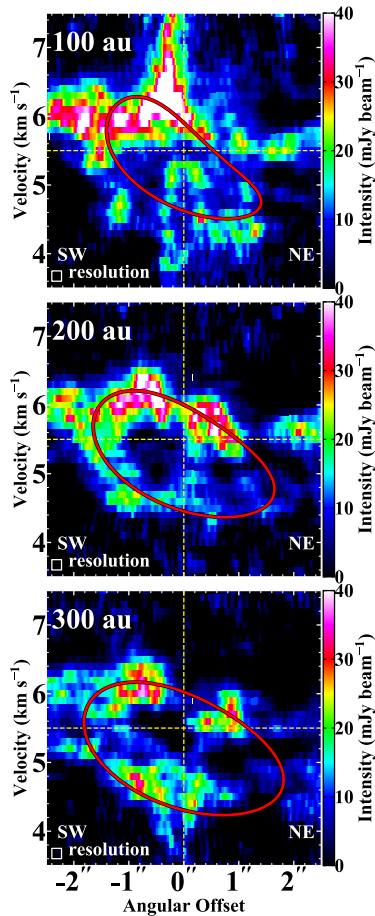


図 1.1.5: Position-velocity diagrams of CS emission and outflow's "Fourth Power Model" (red lines) created at 100 au scale. Numbers at upper left indicate distance from the protostar.

考慮して解析を行ったところ、CMM3A では多くの有機分子 (CH_3OH , CH_3OCHO , CH_3CN , CH_3OCH_3 , CH_3CHO など) が光学的に厚い分子輝線を持つこと、 CH_3OH の分子柱密度が 10^{20} cm^{-2} 程度と非常に高いこと、分子輝線が半径数 10 au 程度の、ビームサイズよりも小さいコンパクトな領域から放出されていることがわかった。 CH_3OH については、 ^{13}C 同位体種との存在量の比が太陽系近傍での同位体比 60:1 に近い値であることも確認された。さらに、ALMA を用いた高分解能 (0.1" 程度) の観測データの解析により、CMM3A の回転構造を初めて検出することに成功した。CMM3A と CMM3B は最終的に 2 つ合わせて 8 太陽質量程度まで成長すると考えられているが、この回転構造からは CMM3A の現在の原始星質量は 0.1–0.5 太陽質量程度と推定され、大質量星形成の初期段階にあると考えられる。CMM3A はアウトフローの解析から誕生後 1000 年程度経過していると考えられており、質量降着率が 10^{-4} 太陽質量/年 程度となっている。この値は一般的な低質量星の質量降着率 (10^{-6} – 10^{-5} 太陽質量/年) と比べて 10–100 倍程度大きい。

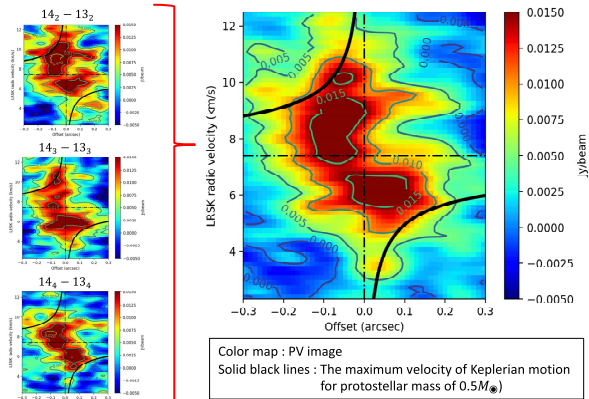


図 1.1.6: Position-velocity diagrams of the CH_3CN emission, which is a composite of the three K structure lines. The protostellar mass is evaluated by assuming the Keplerian rotation for simplicity.

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Watanabe, Y., Nishimura, Y., Sorai, K., Sakai, N., Kuno, N., and Yamamoto, S., "A 3 mm Spectral Line Survey toward the Barred Spiral Galaxy NGC 3627", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **242**, 26 (2019).
- [2] Oya, Y., López-Sepulcre, A., Sakai, N., Watanabe, Y., Higuchi, A.E., Hirota, T., Aikawa, Y., Sakai, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., and Yamamoto, S., "Sulfur-bearing Species Tracing the Disk/Envelope System in the Class I Protostellar Source Elias 29", *The Astrophysical Journal*, **881**, 112 (2019).
- [3] Higuchi, A.E., Oya, Y., and Yamamoto, S., "First Detection of Submillimeter-wave [^{13}C I] $^3P_1^3P_0$ Emission in a Gaseous Debris Disk of 49 Ceti with ALMA", *The Astrophysical Journal Letters*, **885**, L39 (2019).
- [4] Yoshida, K., Sakai, N., Nishimura, Y., Tokudome, T., Watanabe, Y., Sakai, T., Takano, S., and Yamamoto, S., "An unbiased spectral line survey observation toward the low-mass star-forming region L1527", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **71**, S18 (2019).

(学位論文)

- [5] 今井宗明, "Physical and Chemical Structures of Young Low-Mass Protostellar Sources in Isolated Condition" (博士論文)
- [6] 藤田孝典, 「ALMA を用いた原始星近傍におけるアウトフロー構造の探究」 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [7] Y. Oya, and S. Yamamoto, “Unified Picture of Chemical Differentiation in Disk-Forming Regions of Young Low-Mass Protostellar Sources”, SPICA 2019, Crete, Greek, May 20-23, 2019 (poster)
- [8] Okoda, Y., Oya, Y., and Yamamoto, S., “The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages”, SPICA meeting, Crete, Greek, May 19–23, 2019 (Poster)
- [East Asian ALMA Science Workshop 2019, Taipei, Taiwan, Feb. 19-21, 2020]
- [9] Y. Oya, “A 10 au Scale View of the Low-Mass Protostellar Source IRAS 16293-2422 Source A”
- [10] Okoda, Y., Oya, Y., and Yamamoto, S., “Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages”
- [11] Imai, M., Oya, Y., Watanabe, Y., Sakai, N., and Yamamoto, S., “Envelope Structure of Isolated Protostellar Source CB244” (ポスター)
- [12] Fujita, T., Oya, Y., and Yamamoto, S., “Outflow Structures in the Vicinity of the Class 0 Low-mass Protostar in L483” (poster)

招待講演

- [13] Oya, Y., “Sub-mm Views of Disk-Forming Regions in Young Low-Mass Protostellar Sources”, East Asian ALMA Development Workshop 2019, Dec. 10-11, 2019, Tokyo, Japan
- [14] Yamamoto, S., Oya, Y. and Sakai, N., “Chemical Evolution and Its Diversity in Disk Forming Regions”, WE-Heraeus-Seminar: Chemical Evolution of Cosmic Matter, Oct. 23-24, 2019, Bad Honnef, Germany.
- [15] Yamamoto, S., “Why Chemistry in Astronomy”, ENS-UT Workshop on Physics, Nov. 25-26, 2019, Tokyo, Japan.

(国内会議)

一般講演

- [天文学会 2019 年秋季年会、熊本大学、2019 年 9 月 11 日–13 日]
- [16] 大屋瑠子、山本智、「低質量原始星 IRAS 16293-2422 の 10 au スケールでの円盤/エンベロープ構造」、P109a
- [17] 大小田結貴、阿部正太郎、駒木彩乃、大屋瑠子、山本智、「Principal Component Analysis を用いた低質量原始星 L483 の化学組成の解析」、P134b (ポスター+口頭)
- [18] 今井宗明、大屋瑠子、Ana López-Sepulcre、渡辺祥正、坂井南美、山本智、「B335 で原始星最近傍に存在する SiO 輝線」、P143a (ポスター)
- [19] 藤田孝典、大屋瑠子、山本智、「Class 0 低質量原始星天体 L483 のアウトフローの根元の構造」、P108a

- [20] 柴山良希、渡邊祥正、大屋瑠子、山本智、「NGC 2264 CMM3A の ALMA による 0.8 mm 帯化学サーベイの解析」、P122b(ポスター+口頭)
- 【天文学会 2020 年春季年会、オンライン公開、2020 年 3 月 16 日–19 日】
- [21] 大屋瑠子、山本智、「Class 0 低質量原始星天体 IRAS 16293 - 2422 A の内部構造」、P108a
- (セミナー)
- [22] 大屋瑠子、「Physical and Chemical Structures of Low-Mass Protostars on the Disk-Forming Scale”, NAOJ Science Colloquium, July 19, Tokyo, Japan

1 Yamamoto Group

Research Subjects: Millimeter- and submillimeter-wave Astronomy, Star and Planet Formation, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds

Member: Satoshi Yamamoto and Yoko Oya

Molecular clouds are birthplaces of new stars and planetary systems, which are being studied extensively as an important target of astronomy and astrophysics. Although the main constituent of molecular clouds is a hydrogen molecule, various atoms and molecules also exist as minor components. The chemical composition of these minor species reflects formation and evolution of molecular clouds as well as star formation processes. It therefore tells us how each star has been formed. We are studying star formation processes from such an astrochemical viewpoint.

Since the temperature of a molecular cloud is $10 \sim 100$ K, an only way to explore its physical structure and chemical composition is to observe the radio wave emitted from atoms, molecules, and dust particles. Particularly, there exist many atomic and molecular lines in the millimeter/submillimeter wave region, and we are observing them toward formation sites of Solar-type protostars mainly with ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array).

So far, it has well been recognized that an envelope/disk system of a Solar-type protostar shows a significant chemical diversity. One distinct case is so called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC), which is characterized by rich existence of various unsaturated carbon-chain molecules such as C_2H , C_4H , and HC_5N . A prototypical source is L1527 in Taurus. Another distinct case is so called hot corino chemistry, which is characterized by rich existence of various saturated organic molecules such as CH_3OH , $HCOOCH_3$, and C_2H_5CN . A prototypical source is IRAS 16293-2422 in Ophiuchus. Recently, sources having the both characteristics have also be found. Such chemical diversity would reflect the star formation history of each source, more specifically, a duration time of the starless core phase.

We are now studying how such chemical diversity is brought into protoplanetary disks by using ALMA. For the WCCC source L1527, we have found that carbon-chain molecules only exist in an infalling-rotating envelope outside its centrifugal barrier ($r = 100$ AU), while SO preferentially exists around the centrifugal barrier. For the hot corino source IRAS 16293-2422, OCS traces an infalling-rotating envelope, while saturated organic molecules such as CH_3OH and $HCOOCH_3$ trace the centrifugal barrier. Hence, chemical compositions drastically change across the centrifugal barrier of the infalling gas. Since a protostellar disk is formed inward of the centrifugal barrier, the chemical diversity at an envelope scale (~ 1000 au) is indeed inherited in the disk forming region (~ 100 au). Then, what is the initial chemical condition of the Solar System? Is it a common occurrence in our Galaxy? To answer these questions, extensive ALMA observations are in progress.

- [1] Oya, Y. et al. Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293-2422 Source A Studied with ALMA, *Astrophys. J.* **824**, 88 (2016).
- [2] Imai, M. et al. Discovery of Hot Corino in the Bok Globule B335, *Astrophys. J. Lett.* **830**, L37 (2016).
- [3] Okoda, Y. et al. The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages: The Case of the Very-low-mass Protostar IRAS 15398-3359, *Astrophys. J. Lett.* **864**, L25 (2018).