

I

研究室別 2021年度 研究活動報告

1 分野 A

1.1 山本研究室

1.1.1 はじめに

【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つであるとともに、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。そのため、観測・理論両面から活発な研究が行われている。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、このような物質的視点を軸に、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」を主に放射する。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。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 は他の同様の観測装置よりも 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。

1.1.2 星・惑星系形成

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。また、WCCC 天体でありながら内部にホットコリノを含むハイブリッド天体も見出されている。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。

星間分子雲から惑星系への物質進化

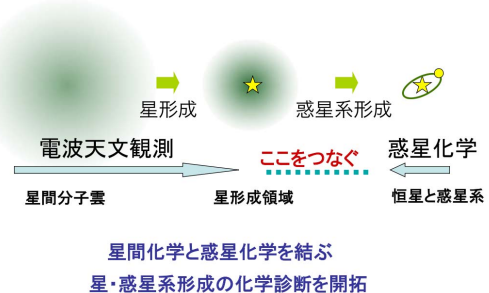


図 1.1.1: A schematic illustration of our goal

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。

ALMA による観測では、膨大な分子スペクトル線データが得られるが、これまではその中から適切なものを選んで解析を行ってきた。しかし、これでは ALMA による観測能力を十分活かしきっていないばかりか、スペクトル線の選択や結果の議論に恣意性が入り込む余地がある。そこで、スペクトル線分布の空間 (2次元) および速度 (1次元) 情報を先入観なく比較・分類するために、機械学習の方法を本格的に取り入れている。

1.1.3 観測成果

【IRAS 16293–2422 Source A の円盤内部構造における有機分子分布】

へびつかい座にある IRAS 16293–2422 は、Class 0 の低質量原始星連星である。連星系を成す Source A 自体も非常に近接した連星系または多重星系である (図 1.1.2)。この天体は、複雑な飽和有機分子に富む化学的特徴を持ち、代表的な hot corino 天体として知られる。我々は、このような連星系 (多重星系) 形成における分子分布の特徴を明らかにするために、ALMA を用いた高解像分子輝線観測を実施した。

波長 3 mm 帯で 30 au を切る高解像度観測を行なった結果、メタノール (CH_3OH), CH_2DOH 、エタノール ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)、エチレングリコール ($(\text{CH}_2\text{OH})_2$) について、それぞれ複数の分子輝線を検出した。これら 4 種の分子種のいずれもが北東-南西に向けた速度勾配を示し、従来知られていたガスの回転運動を捉えることがわかった。これらの有機分子輝線の強度は、原始星 A1 の位置よりも A2 の位置で弱い傾向が見られた。このことは、分子の柱密度、励起状態、光学的厚みの影響が 2 つの原始星に付随するガスの間で異なっていることを示唆する。

この天体は、原始星 A1 に付随する星周円盤 (半径 < 50 au) と、その外側で Source A 全体を取り巻く circummultiple 構造の、少なくとも 2 つの回転ガス構造をもつ (Oya et al. 2020)。これらの物理構造と対応して、有機分子の分布に違いが見られた。メタノール分子の比較的低励起の輝線は星周円盤よりも広がって検出され、高励起輝線および同位体種の輝線は星周円盤で検出された。エチレングリコール分子の輝線は原始星 A2 から半径 40 au 以内のコンパクトな領域に集中する傾向が見られた。反対に、エタノール分子の一部の輝線は、星周円盤の外縁で検出され、この位置での物理構造の遷移との関連が示唆される。

【低質量原始星天体 Elias 29 での温度構造の解析】

低質量原始星天体 Elias 29 は、へびつかい座にある比較的進化の進んだ Class I 天体である。我々は

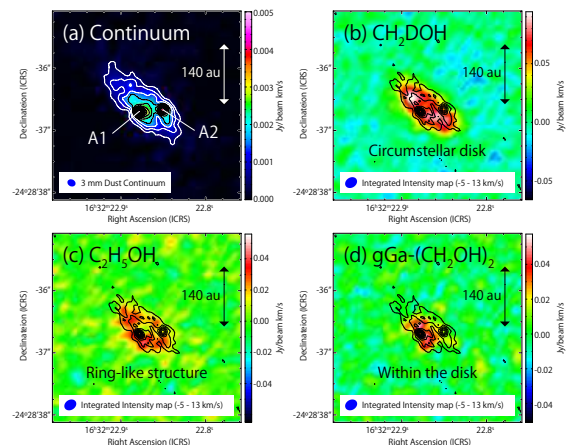


図 1.1.2: Integrated intensity maps of complex organic molecules in IRAS 16293–2422 Source A. (a) Color image of dust continuum emission at the wavelength of 3 mm. (b-d) Contours represent the integrated intensity map of CH_3OH . (b) CH_3OH and CH_2DOH are detected in the circumstellar disk around A1. (c) $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ is detected in the outer rim of the disk. (d) $(\text{CH}_2\text{OH})_2$ is concentrated in the inner disk.

ALMA を用いた大型プロジェクト FAUST の一部として、Elias 29 に対する分子輝線観測を実施した。波長 1.3 mm で、SO 分子の輝線を 2 本検出した。これらの分子輝線の強度は、分子の回転温度を反映している。このことを利用して、輝線強度の比の分布を解析することで、ガスの温度分布を調べた。図 1.1.3 は、2 本の輝線から得られた SO 分子の回転温度の分布を表す。原始星の近傍で回転温度が高く、ガスの温度が高くなっていると解釈できる。これは、原始星からの輻射によってガスが温められているためと考えられる。加えて、原始星から離れた二つの位置でも、回転温度が高くなっている様子が見られた。原始星の東側にある回転温度が高い位置 (図 1.1.3 中の Bow shock) では、SO 分子輝線の強度が大きく、また、ガスの速度分散が大きかった。原始星の南側にはガスが局在して分布する ridge 成分があり、その一部でガスの温度が高くなっていることがわかった (図 1.1.3 中の Interaction region)。この位置では、 HCO^+ 分子の重水素化物の比の値 ($\text{DCO}^+/\text{H}^{13}\text{CO}^+$) が低くなっている様子が見られる。これらの結果は、いずれも、この位置でガスの温度が局所的に上がっていることを示唆する。この位置は、ridge 成分とアウトフロー構造が天球面上で交差する位置にあたる。これらの結果から、上記の二つの位置では、原始星から噴き出したガス (ジェット/アウトフロー) が衝突し、ガスの温度が高くなっていると考えられる。

【温度分布が示す Accretion shock の兆候: 低質量原始星天体 B335】

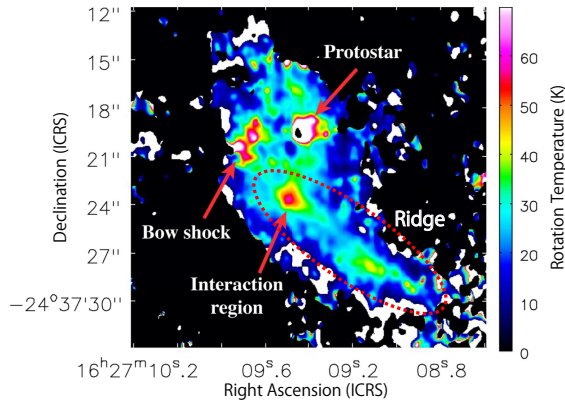


図 1.1.3: Distribution of the Rotation temperature of SO in the low-mass protostellar source Elias 29

B335 は、Class 0 低質量原始星 IRAS 19347+0727 を付随する孤立した天体である。原始星周り数 100-数 1000 au のスケールで不飽和炭素鎖分子 (WCCC)、数 10 au で飽和有機分子 (COMs) が豊富であるハイブリッドな化学組成の特徴を持つ。この天体において、3 au 程度の高分解能観測を行い、原始星周り数 10 au スケールに 32 本の分子輝線を検出した。それらの分子分布を主成分分析 (PCA) で調べた結果、 NH_2CHO と t-HCOOH は、 CH_3OH と CH_2DOH の分布に比べ原始星に集中した分布を持つことがわかった。この分布の違いを活かして、温度分布を調べたところ、半径 6 au で降着衝撃波の兆候を見出した。上記 4 つの分子輝線から見積もった温度は、原始星から離れるにつれて一度下がり、再び上昇する様子を示した (図 1.1.4)。原始星からの放射のみではこの描像を説明することができない。外側の温度上昇を引き起こす最も有力なメカニズムとして、降着するガスと原始星周りのガスとの衝突によって引き起こされる衝撃波による加熱を提案した。一方、エンベロープの外側において、温度が氷マントルの蒸発する 100 K 以上であるにもかかわらず t-HCOOH と NH_2CHO が検出されなかった。この結果は、これらの分子が単にダストの氷マントルからの蒸発だけでは説明できないことを示す。

【円盤/エンベロープ構造の 3 次元力学モデル】

原始星に付随する円盤/エンベロープ構造を成すガスの速度構造は、ケプラー回転円盤と回転しながら落下するエンベロープガスの二つに大別される (図 1.1.5)。これらの速度構造をもつガス円盤の 3 次元モデルを構築した¹。このモデルを用いて作成した 3 次元の擬似観測データと、ALMA による実際の分子輝線観測データを比較²することで、原始星質量や天体の傾き角などのパラメータが制限される。また、擬似観測データを教師データとして、機械学習/深層学習による解析を適用することで、観測された速度構造の判別を行う手法を開発している。深層学習の一種で

¹<https://github.com/YokoOya/FERIA>

²<https://github.com/YokoOya/cubechi2>

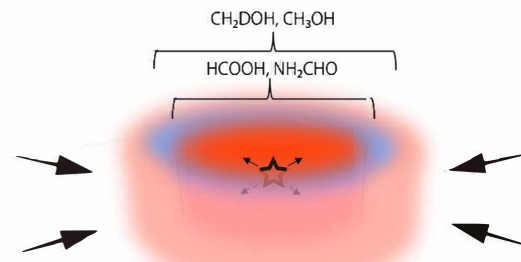


図 1.1.4: Schematic illustration of the disk/envelope system. The temperature of the region in red is higher than that in blue. Accretion shock by an infalling gas raises the temperature of the outer part.

ある 3DCNN (3-Dimensional Convolutional Neural Network; 3 次元畳み込みニューラルネットワーク) を用いて、速度構造 (図 1.1.5b, c) を判別する学習器を作成した。2 種類の速度構造について、パラメータの異なる擬似観測データを 209 個ずつ作成し、その内 138 個ずつを学習・検証用データ、71 個ずつを汎化性能のテスト用データとして、学習を行った。その結果、計 142 個のテスト用擬似観測データはすべて正しく判別された。この学習器を、低質量原始星天体 IRAS 16293-2422 Source A での ALMA 観測データに適用したところ、18 本の分子輝線の速度構造はいずれもケプラー回転として判別された。この結果は、機械学習の一種である SVM (Support Vector Machine) による判別結果と必ずしも一致しない。このことは、観測された分子輝線データが単一の速度構造で説明されないことを示唆する。また、学習器によって着目される特徴量が異なることが、判別結果に影響していると考えられる。このため、学習器の改良と適用方法を考慮することで、観測データが持つ情報を従来とは異なる視点から捉えられることが期待される。

【速度構造も含めた 3 次元データに対する Principal Component Analysis (PCA): 低質量原始星天体 L483】

L483 は、Class 0 低質量原始星であり、原始星周り数 100-数 1000 au のスケールで不飽和炭素鎖分子 (WCCC)、数 10 au で飽和有機分子 (COMs) が豊富であるハイブリッドな化学組成の特徴を持つ。ALMA で観測したところ、円盤・エンベロープ構造において 23 種類の分子輝線を検出した。これらの化学組成分布の特徴を一つずつ目で見て判断するのは困難である。そこで我々は、無バイアスの解析手法として、主成分分析 (PCA) を導入し、その有効性を示した。分子輝線データは 2 次元分布に加え、速度構造も重要である。3 次元のデータに対する PCA によって、観測データを余すことなく活用し、化学組成分布の特

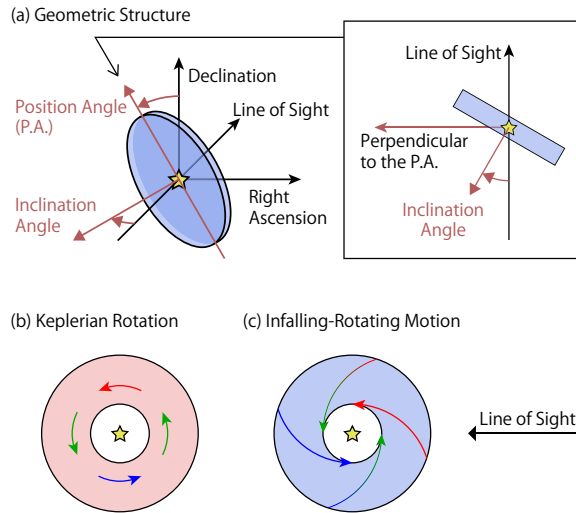


図 1.1.5: (a) A conceptual illustration of the 3D kinematic model for a disk/envelope system around a protostar. (b) Velocity structure of a disk with Keplerian rotation. (c) Velocity structure of an infalling-rotating gas.

徴を先入観なく分類した。その結果、酸素を含む分子と窒素を含む分子の分布の違いを系統的に示した(図 1.1.6)。いくつかの窒素を含む分子は酸素を含む分子に比べ、PC2 が大きい傾向にあり、原始星周りに集中した分布を示す。特に、窒素を含む分子である NH_2CHO と HNCO はよく似た分布を示し、高速度成分を持つことがわかった。これらの分子は、惑星系でも検出され、分子の化学過程を調べる上でも重要視される。3次元 PCA は、今後膨大な観測データの新たな手法として期待され、上で述べた B335 の解析においても活用した。

<報文>

(原著論文)

- [1] Shibayama, Y., Watanabe, Y., Oya, Y., Sakai, N., Lopez-Sepulcre, A., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., Zhang, Y., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., “Exploring the 100 au Scale Structure of the Protobinary System NGC 2264 CMM3 with ALMA”, *ApJ*, 918, 32 (2021).
- [2] Oya, Y., Watanabe, Y., López-Sepulcre, A., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Favre, C., and Yamamoto, S., “Rotating Motion of the Outflow of IRAS 16293-2422 A1 at Its Origin Point Near the Protostar”, *ApJ*, 921, 12 (2021).
- [3] Okoda, Y., Oya, Y., Abe, S., Komaki, A., and Yamamoto, S., “Molecular Distributions of the Disk/Envelope System of L483: Principal Component Analysis for the Image Cube Data”, *ApJ*, 923, 168 (2021).

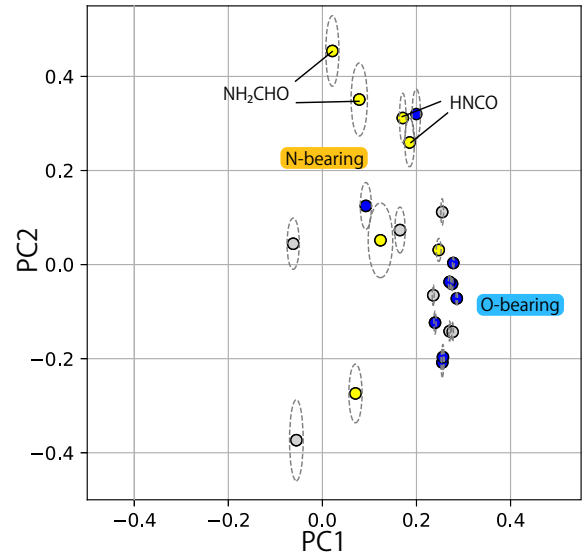


図 1.1.6: Biplot of the contributions for the principal components in PCA-3D for each molecular line distribution on the PC1-PC2 plane. Different distributions between O-bearing complex organic molecules (COMs) and N-bearing ones can be seen in this plot.

- [4] Ohashi, S., Codella, C., Sakai, N., Chandler, C.J., et al., “Misaligned Rotations of the Envelope, Outflow, and Disks in the Multiple Protostellar System of VLA 1623-2417: FAUST. III”, *ApJ*, 927, 54 (2022).

(総説)

- [5] 大屋瑠子、大小田結貴、「若い低質量原始星天体の円盤構造における有機分子化学の観測研究」、天文月報「アストロケミストリー」特集, 4月号, 2022年

(学位論文)

- [6] 大小田結貴、「Physics and Chemistry in the Beginning of Low-Mass Star Formation (最初期形成過程における低質量原始星天体の物理・化学構造)」(博士論文)
- [7] 雑賀恵理、「Class I 原始星 Elias 29 のアウトフローおよびその周辺環境との相互作用 (The Outflow of the Class I Protostar Elias 29 and Its Interaction with the Environment)」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [8] Yoko Oya, “Chemical Differentiation and its Relation with the Physical Structures in Disk-Forming

- Regions of Young Low-Mass Protostellar Sources”, Workshop on Interstellar Matter 2021, November 2021, Online
- [9] Yuki Okoda, Yoko Oya, Muneaki Imai, Nami Sakai, Yoshimasa Watanabe, Ana Lopez-Sepulcre, and Satoshi Yamamoto, “Compact Distributions of N-bearing species and HCOOH in the Protostellar Source B335”, Workshop on Interstellar Matter 2021, November 2021, Online
- [10] Yoko Oya, “Rotation Motion in Circumstellar Structure, Circumstellar Disk, and Outflow: the IRAS 16293-2422 Source A Case”, East Asia ALMA Science Workshop 2022, January 2022, Online
- 招待講演
- [11] Yoko Oya, “Chemical Differentiation and its Relation with the Physical Structures in Disk-Forming Regions of Young Low-Mass Protostellar Sources”, Astrochemical Frontiers 2021 Quarantine Edition 2, September 2021, Online (keynote talk)
- [12] Satoshi Yamamoto, “FAUST”, East Asia ALMA Science Workshop 2022, January, Online
- [13] Yoko Oya, “Unbiased Analyses of 3-Dimensional Molecular Line Data with Unsupervised/Supervised Machine Learnings”, East Asia ALMA Development Workshop 2022, March 2022, Online
- (国内会議)
- 一般講演
- 【天文学会 2021 年秋季年会、オンライン開催、2021 年 9 月】
- [14] Eri Saiga, Yoko Oya, Anna Miotello, Cecilia Ceccarelli, Claudio Codella, Claire Chandler, Nami Sakai, Satoshi Yamamoto, and FAUST Team Members, “ALMA View of Molecular Outflow in Elias 29”, P131a
- [15] Yoko Oya, Muneaki Imai, Brian Svoboda, Haiyu Baobab Liu, Cecilia Ceccarelli, Claire Chandler, Claudio Codella, Nami Sakai, Satoshi Yamamoto, and FAUST team members, “Chemical and Physical Characterization of the Isolated Source CB68”, P134a
- [16] 大小田結貴, 大屋瑠子, 今井宗明 (東京大学), 坂井南美 (理化学研究所), 渡邊祥正 (芝浦工業大学), Ana Lopez-Sepulcre (IPAG), 山本智 (東京大学), 「B335 における原始星近傍 10 au スケールの化学組成分布と速度構造」、P135a
- [17] Yuki Okoda, Yoko Oya, Logan Francis, Doug Johnstone, Shu-ichiro Inutsuka, Satoshi Yamamoto, and FAUST team members, “Hot Corino Activity in IRAS 15398 – 3359 at a 50 au Scale”, P150a
- 【天文学会 2022 年春季年会、オンライン開催、2022 年 3 月】
- [18] 大屋瑠子, 矢口公貴, 李維遠, 山本智, 「IRAS 16293 - 2422 Source A の星周円盤における複雑な飽和有機分子の分布」、P151a
- [19] Eri Saiga, Yoko Oya, Anna Miotello, Cecilia Ceccarelli, Claudio Codella, Claire Chandler, Nami Sakai, Satoshi Yamamoto, and FAUST Team Members, “Temperature structure of the Class I protostar Elias 29 and its environment”, P154a
- 【その他の国内講演】
- [20] 大屋瑠子, 「円盤形成初期にある連星系 IRAS 16293-2422 A を取り巻くエンベロープガス、原始星円盤、およびアウトフローの関係」、日本地球惑星科学連合 2021 年大会、2021 年 6 月、オンライン開催、PCG19-04
- 招待講演
- [21] Yoko Oya, “Chemical Views of Outflows in Low-Mass Protostellar Sources”, Cold outflows near and far: crossroad of our current understandings, 2021 年 11 月、オンライン開催
- [22] 大屋瑠子, 「低質量原始星天体に伴う円盤とその内部構造における物理・化学」、宇宙電波懇談会シンポジウム 2021、2022 年 3 月、オンライン開催

II

Summary of group activities in 2021

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 – 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, the ALMA large program FAUST (Fifty AU Study of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostar) is ongoing. Furthermore, we are now incorporating machine-learning techniques to explore the physical and chemical structures in an unbiased way.

[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] Oya, Y. and Yamamoto, S. Substructures in the Disk-forming Region of the Class 0 Low-mass Protostellar Source IRAS 16293–2422 Source A on a 10 au Scale, *Astrophys. J.*, **904**, 185 (2020).

[3] Okoda, Y. et al. FAUST II. Discovery of a Secondary Outflow in IRAS 15398–3359: Variability in Outflow Direction during the Earliest Stage of Star Formation?, *Astrophys. J.*, **910**, 11 (2021).

[4] Okoda, Y. et al. Molecular Distributions of the Disk/Envelope System of L483: Principal Component Analysis for the Image Cube Data, *Astrophys. J.*, **923**, 168 (2021).