

I

研究室別 2022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や紫外線環境によると考えられ、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

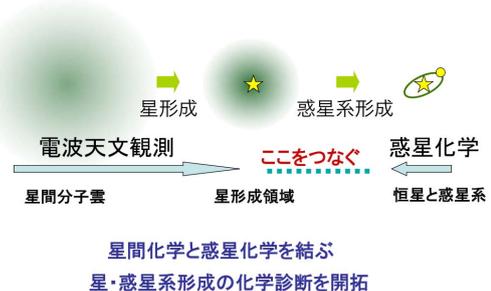


図 1.1.1: A schematic illustration of our goal

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しつつある。

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

【回転・落下ガスの速度構造の三次元力学モデル】

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 1.1.2)。これらの速度構造をもつガス円盤の三次元モデルを構築した (FERIA; Flat Envelope Model with Rotation and Infall under Angular momentum conservation)¹。

このモデルを用いて作成した三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た。深層学習の一種である 3DCNN (3-Dimensional Convolutional Neural Network; 三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 1.1.2b, c) を判別する学習器を作成した。学習器を低質量原始星天体 IRAS 16293–2422 Source A での ALMA 観測データに適用することで、18 本の分子輝線の速度構造を分類した。学習器とその適用方法をさらに改良していくことで、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。この成果を学術論文としてまとめ、出版した。[1]

このモデルは、若い原始星天体を巻き巻く円盤/エンベロープガスの速度構造の他、活動銀河核を巻き巻くコンパクトなトーラス構造など、回転を伴うガス運動の解析に広く適用できる可能性がある (図 1.1.3)。

【FAUST の初期成果】

日米欧の協働による国際共同研究プロジェクト FAUST (Fifty AU Study of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars) では、若い低質量原始星天体に対して ALMA による化学サーベイ観測

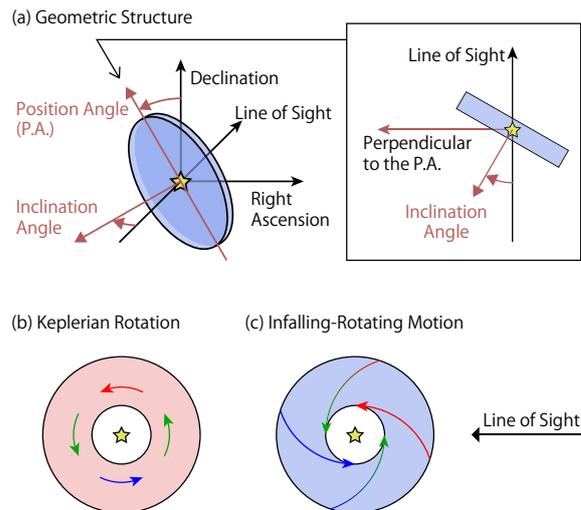


図 1.1.2: (a) Schematic illustration of the three dimensional (3D) dynamical model of a disk/envelope system. (b) Velocity structure of the disk with a Keplerian rotation. (c) Velocity structure of the infalling-rotating gas.

を実施した。13 個のターゲット天体において、共通の感度・空間解像度で、多種多様な分子輝線を観測した。その結果、複雑な飽和有機分子を豊富に含む天体と、それらがほとんど検出されない天体が見出された。このことは、原始星を取り巻くガスの化学組成に、天体間で多様性があることを示している (図 1.1.4)。

また、一つの日体の中でも、ガスの化学組成が空間的に変化することがわかった。Class 0 の若い低質量原始星天体 CB68 での、FAUST で観測された分子輝線の分布の様子を図 1.1.5 に示す。不飽和な炭化水素分子の輝線は広がって分布 ($\sim 1,000$ au) し、複雑な飽和有機分子の輝線は原始星に集中したコンパクトな分布 (< 100 au) をしていることがわかった。分子種の違いによる分布の違いは、FAUST で観測された他の天体でも同じ傾向が確認された。この現象の概念図を図 1.1.4 に示す。この描像は、従来いくつかの日体で個別に報告されてきた [6] が、FAUST で取得された均質な観測データを用いて、より多くの天体と多くの分子種での結果に基づいて確立することができた。

【IRAS 15398-3359 における飽和有機分子の検出】

FAUST プログラムで観測した天体の一つである IRAS 15398-3359 において、 CH_3OH の高励起スペクトル線や HCOOCH_3 のスペクトル線を原始星方向のコンパクトな領域で検出した。この天体は、1000 au スケールで炭素鎖分子などの不飽和有機分子に恵まれる WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) 天体として知られていたが、原始星の極近傍にはホットコリノ化学を示す複雑な飽和有機分子を伴っているこ

¹<https://github.com/YokoOya/FERIA>

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

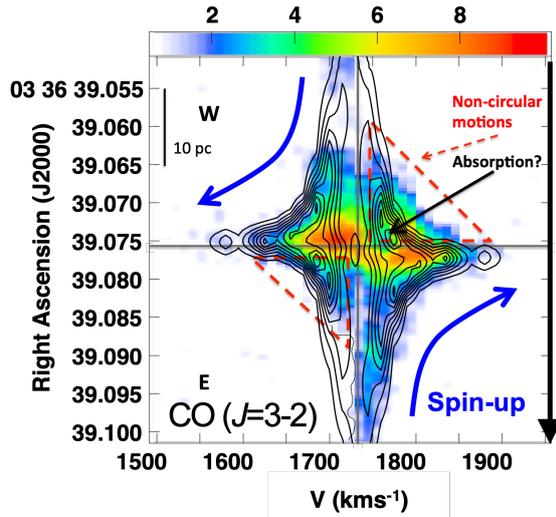


図 1.1.3: Velocity structure of the gas surrounding the AGN of NGC1377. Color represents the observation result of the CO emission, while black contours show the result of the 3D dynamical model. The observed CO emission reveals “Non-circular motions”. It can be explained by the dynamical model involving an infall motion. [2]

とが明らかになった。即ち、この天体は WCCC とホットコリノ化学の両方が異なる空間スケールで共存するハイブリッド天体であることが示された。そのような天体は B335, L483, CB68 でも見られており、原始星天体の化学組成の「標準形」であると考えられる。IRAS 15398 では CH_3OH の高励起線はディスク方向に僅かに広がっていた。このこととスペクトル解析から得られるビームフィリングファクターから、その放射領域はディスク表面の薄い領域と見られ、ディスク面への降着衝撃波による加熱が示唆される。[3]

1.1.4 研究室を閉じるにあたって

山本は 2023 年 3 月 31 日をもって東京大学を定年退職しました。1993 年からちょうど 30 年の長きにわたり、理学系研究科および同物理学専攻にお世話になったことになりました。その間、宇宙の物質に着目して、星間雲から星・惑星形成に至る化学進化の観測研究を楽しみました。国立天文台野辺山 45 m 望遠鏡や ALMA など先端電波望遠鏡による観測研究、富士山頂サブミリ波望遠鏡の建設と運用、テラヘルツ帯の検出器の開発など、様々なことに取り組みました。定年退職にあたり、これまでの研究生活を支えていただいたすべての方に感謝申し上げます。なお、大屋助教は 2022 年 10 月 1 日付けで京都大学

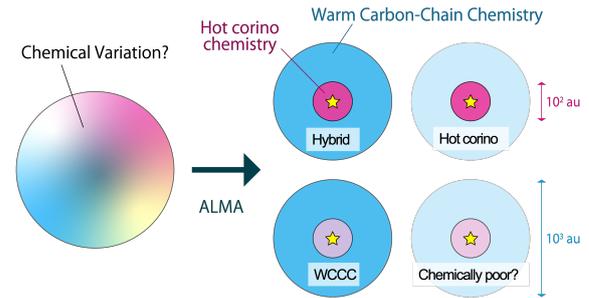


図 1.1.4: Conceptual view of the chemical structure and its diversity of young protostellar sources revealed by the ALMA large program FAUST. Hot corino chemistry characterized by rich existence of saturated organic molecules is seen in a hot region (>100 K) near the protostar, while warm carbon-chain chemistry (WCCC) characterized by rich existence of unsaturated hydrocarbon molecules is seen in a warm region (> 25 K) surrounding the hot region. This is a typical chemical structure of young protostellar sources. Relative appearance of these two distinct chemical features is different from source to source: some only show hot corino chemistry and some only WCCC. [6]

基礎物理学研究所に講師として異動しています。

在職中、多くの大学院生、助教、そして共同研究者の皆さんと研究を共にしました。理学系研究科において、23 名の博士取得者、42 名の修士取得者を見てきましたが、彼ら彼女らが常に研究を引っ張ってくれて、その中で私自身も多くを学びました。自然の前では、学生も教員も平等です。実際、大学院生や共同研究者から、自分では考え付かないアイデアや方法、結果が出されることもしばしばでした。若い優秀な人たちと一緒に研究できたことは幸せで、素晴らしい思い出とともに感謝の気持ちで一杯です。

それとともに、天文学と化学の境界をやっている私を受け入れて育てていただいた物理学教室およびビッグバン宇宙国際研究センターの大きな包容力には感謝の言葉もありません。皆様との交流で、研究についても直接、間接に大きな刺激をいただきました。教室の皆様の期待に十分応えられたとは思いませんが、宇宙物理学の世界を 1 ミリくらい上げられたのではないかと思います。研究・教育に加えて、ここ 8 年くらいは副研究科長や専攻長を務めましたが、その中で、物理学教室のみならず、理学系研究科の事務職員、技術職員の皆様にも大変お世話になりました。理学系研究科が持続的に成長を続けているのは、すべての構成員の力によるものだと実感しました。物理学教室、ビッグバン宇宙国際研究センター、そして、理学系研究科の益々のご発展を

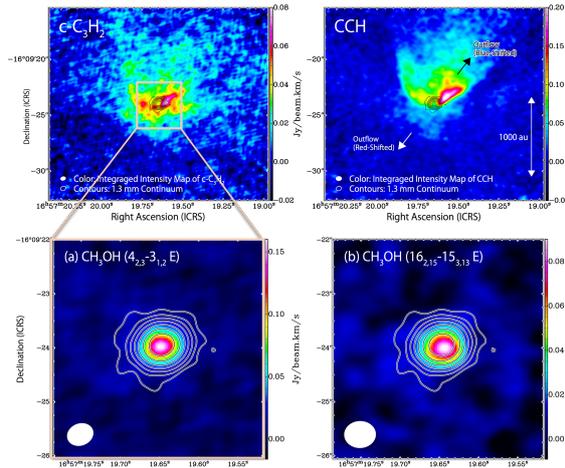


図 1.1.5: Molecular distribution of the young (Class I) low-mass protostellar source CB68. Color represents the integrated intensity maps of four molecular species observed with ALMA, while contours show the distribution of the 1.3 mm continuum emission. Emission of the unsaturated hydrocarbons (upper panels; $c\text{-C}_3\text{H}_2$, CCH) is extended over the 1000 au scale. On the other hand, emission of the saturated organic molecule (lower panels; CH_3OH) is concentrated within a 100 au area around the protostar. [5]

祈念しています。

最後に、研究生活を支えてくれた家族にもこの場を借りて感謝したいです。研究第一の生活の中で、十分に時間を取ってこなかったことを後悔しています。これからは、総合研究大学院大学での業務とともに、そのような時間を増やして楽しみたいと思います。

<報文>

(原著論文)

- [1] Oya, Y., Kibukawa, H., Miyake, S., *et al.*, 2022, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **134**, 094301.
- [2] Aalto, S., Falstad, N., Muller, S., *et al.*, 2020, Astronomy & Astrophysics, **640**, A104.
- [3] Okoda, Y., Oya, Y., Yamamoto, S. (19人中19番目) 他, "FAUST VII. Detection of a Hot Corino in the Prototypical Warm Carbon-Chain Chemistry Source IRAS 15398-3359", *Astrophys. J.*, in press.
- [4] Okoda, Y., Oya, Y., Imai, M., Sakai, N., Watanabe, Y., Lopez-Sepulcre, A., Saigo, K., and Yamamoto, S., "Chemical Differentiation and Temperature Distribution on a Few au Scale around

the Protostellar Source B335", *Astrophys. J.*, **935**, 136 (20 pages) (2022).

- [5] Imai, M., Oya, Y. *et al.*, "Chemical and Physical Characterization of the Isolated Protostellar Source CB68: FAUST IV", *Astrophys. J.*, **934**, 70 (18 pages) (2022).

(書籍)

- [6] Oya, Y., "A Few Tens au Scale Physical and Chemical Structures Around Young Low-Mass Protostars", Springer (2022)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [7] Oya, Y., "Protostellar Source Elias 29: Deficiency in Organic Molecules and Richness in Sulfur-Bearing Species", *Molecules in Extreme Environment*, Tokyo (Japan), November 2022 (Online)
- [8] Oya, Y., "Rotation Motion of the Envelope/Disk/Outflow in IRAS 16293-2422 Source A", *A half century of millimeter and submillimeter astronomy: Impact on astronomy/astrophysics and the future*, Miyako (Japan), December 2022
- [9] Okoda, Y., "Physics and Chemistry in the Beginning of Low-Mass Star Formation", 241st AAS meeting, Seattle (USA), January, 2023
- [10] Okoda, Y. *et al.*, "Detection of A Hot Corino in the Prototypical Warm Carbon-Chain Chemistry Source IRAS 15398 - 3359", East Asia ALMA Meeting, New Taipei City (Taiwan), February, 2023

(国内会議)

【天文学会 2022 年秋季年会、新潟大学、2022 年 9 月】

- [11] 大小田結貴、小山貴裕、坂井南美、渡邊祥正、Ana Lopez-Sepulcre、大屋瑠子、今井宗明、山本智、「低質量原始星 B335 における CH_3OH の重水素化物」、P119a

【天文学会 2023 年春季年会、オンライン、2023 年 3 月】

- [12] Okoda, Y. *et al.*, 「非常に若い低質量原始星 IRAS 15398 - 3359 の物理・化学構造」、Z110a

【次世代アストロケミストリー、Hybrid、2022 年 11 月】

- [13] 小山貴裕、坂井南美、渡邊祥正、Ana Lopez-Sepulcre、大屋瑠子、今井宗明、山本智、「若い低質量原始星天体 B335 周りの化学組成」
- [14] 大小田結貴、小山貴裕、坂井南美、渡邊祥正、Ana Lopez-Sepulcre、大屋瑠子、今井宗明、山本智、「Deuterated CH_3OH in the Low Mass Class 0 protostellar source B335」

招待講演

- [15] Yoko Oya, “Chemical Diagnostics for Embedded Disk/Torus Structures in Protostellar Sources: Any Analogies with AGN Cases?”, Behind a Curtain of Dust IV, Sesto (Italy), July 2022
- [16] Yoko Oya, “Chemical Differentiation and its Relation with the Physical Structures in Disk-Forming Regions: This and the Next Decade”, Symposium on Next Generation Astrochemistry, Tokyo (Japan), November 2022
- [17] Yoko Oya, “Chemical Diagnostics for Tracing the Physical Structures in Disk-Forming Regions of Young Low-Mass Protostellar Sources”, East Asia ALMA Science Workshop 2023, New Taipei City (Taiwan), February 2023
- [18] Satoshi Yamamoto, “Chemical View of Star and Planet Formation”, Second International Symposium on Trans-Scale Quantum Science, Tokyo (Japan), November, 2022
- [19] Satoshi Yamamoto, “50 Years of Astrochemistry: My Personal View”, A Half Century of Millimeter and Submillimeter Astronomy, Miyakojima (Japan), December 2022
- (国内会議)
- 一般講演
- 【天文学会 2022 年秋季年会、新潟大学 (新潟)、2022 年 9 月】
- [20] 大屋瑤子、山本智、「Class I 低質量原始星天体 Elias 29 の円盤構造における落下運動の可能性」、P110a
- [21] 大小田結貴、小山貴裕、坂井南美、渡邊祥正、Ana Lopez-Sepulcre)、大屋瑤子、今井宗明、山本智、「低質量原始星 B335 における CH₃OH の重水素化物」、P119a
- 【天文学会 2023 年春季年会、立教大学 (東京)、2023 年 3 月】
- [22] 大小田結貴、大屋瑤子、Logan Francis、Doug Johnstone、犬塚修一郎、Cecilia Ceccarelli、Claire Chandler、Claudio Codella、坂井南美、山本智、FAUST Team、「FAUST: 非常に若い低質量原始星 IRAS 15398 – 3359 の物理・化学構造」、Z110a
- 招待講演
- 【天文学会 2023 年春季年会、立教大学 (東京)、2023 年 3 月】
- [23] Yoko Oya, Cecilia Caccarelli, Claudio Codella, Claire J. Chandler, Nami Sakai, Satoshi Yamamoto, and FAUST team members, “ALMA Large Project FAUST (Fifty AU STudy of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars)”, Z109r (review talk)
- 【その他の国内講演】
- [24] 大屋瑤子、「若い太陽型原始星の原始星円盤形成領域における化学組成分布と物理構造の関係」、次世代アストロケミストリー領域研究会、東京大学 (東京)、2023 年 3 月
- 一般向け講演
- [25] 大屋瑤子、「巨大電波望遠鏡で見上げる星空 ~ 太陽系の昔の姿とは? ~」、湯川博士の贈り物 3、京都大学 (京都)、2023 年 1 月

II

Summary of group activities in 2022

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.

Note: Our group is closed on March 31, 2023 due to formal retirement of Satoshi Yamamoto. Yoko Oya already moved Kyoto University on Oct.1, 2022.

- [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).