

# 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。

### 1.1.2 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、 $\text{HCOOCH}_3$  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。

#### 星間分子雲から惑星系への物質進化

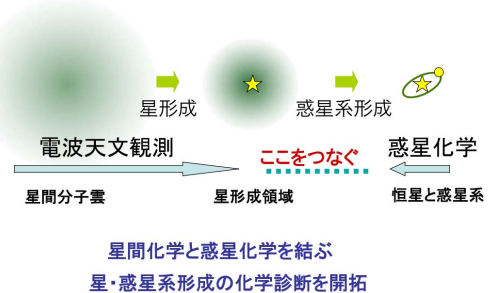


図 1.1.1: A schematic illustration of our goal

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、昨年度から機械学習の方法を本格的に取り入れることを考えている。

### 1.1.3 観測成果

#### 【低質量原始星天体 IRAS 16293–2422 のアウトフロー構造】

IRAS 16293–2422 は、へびつかい座にある連星系 (Source A, Source B) である。ALMA データの解析により、Source A から北西-南東方向に吹き出すアウトフロー構造を検出した (図 1.1.2)。このアウトフロー構造は、以前に数 1000 au スケールでの観測で報告されていたものと矛盾しない。Source A 自体もまた、原始星 A1 と A2 から成る非常に近接した連星系である。高解像度観測の結果、このアウトフローが原始星 A1 に付随するものであることがわかった。加えて、SO 分子輝線の速度構造の解析から、このアウトフローが回転運動をもつことを明らかにした。ガスがもつ比角運動量を見積もった結果、このアウトフローは、原始星 A1 に付随する円盤構造から角運動量を抜き取っている可能性が示唆された。このことは、円盤から原始星へのガスの降着を助け、原始星の進化に寄与すると考えられる。

#### 【非常に若い原始星 IRAS 15398–3359 で捉えたアウトフローの方向変化】

IRAS 15398–3359 は、おおかみ座にある Class 0 原始星で、非常に小さな質量を持つ誕生したばかりの天体である。ALMA の大型プログラム FAUST のデータを用いて 0.3" (50 au) の分解能で観測した結果、以前の観測で捉えた北東から南西に伸びるアウトフロー構造に加え、このアウトフローと垂直な方向に伸びる構造を今回新たに捉えた (図 1.1.3)。H<sub>2</sub>CO と C<sup>18</sup>O では、原始星付近で北西から南東に細く伸びる構造を示し、H<sub>2</sub>CO ではさらにその構造に続いて伸びるアーク構造が見られた。この構造は、衝撃波領域をトレースすることが知られている SO, SiO, CH<sub>3</sub>OH でも見られる。このことから、アーク構造が衝撃波領域であり、その速度が遅いことから新たに捉えた構造は過去のアウトフローであることがわかった。このように、非常に若い原始星で原始星進化に伴うアウトフローの方向変化を初めて観測的に示した。

#### 【L483 の原始星付近のアウトフロー構造】

L483 のアウトフローを ALMA で観測し、CS ( $J=5-4$ ) 輝線の観測結果を用いてその構造について議論した。これまで、この天体では、原始星から 1000 au

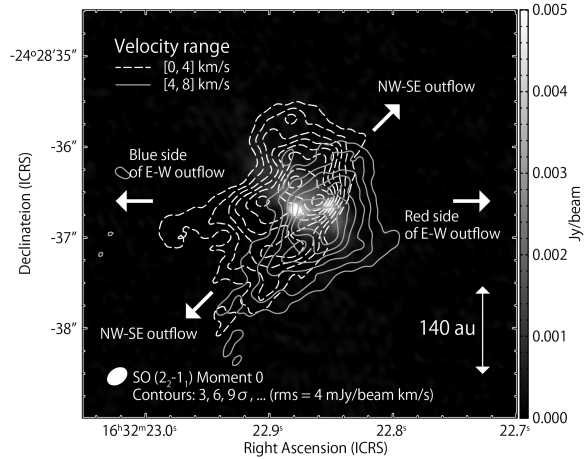


図 1.1.2: Integrated intensity maps of the SO ( $J_N = 2_2 - 1_1$ ; contours) line overlaid on the 1.3 mm continuum map (gray scale) observed with ALMA. The solid contours represent the red-shifted component, while the dotted contours the blue-shifted one. The SO emission traces the northwest-southeast (NW-SE) outflow lobes. The northeastern and southwestern sides of the outflow are blue-shifted and red-shifted, respectively, likely due to the rotating motion around the outflow axis.

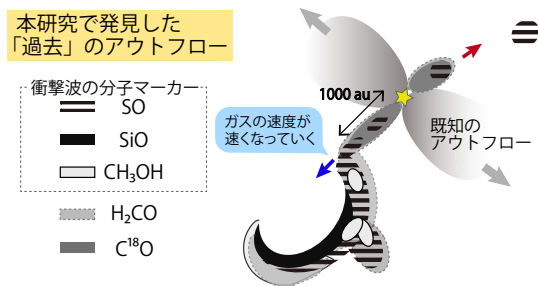


図 1.1.3: Schematic picture of the molecular distributions around IRAS 15398–3359. A structure along the top right to bottom left is a past outflow from IRAS 15398–3359 found in this study.

程度離れた領域でアウトフローの構造と、原始星から 100 au ほど離れた場所でのアウトフローの向きの変化が示されていた。それらの解析においては、アウトフローのモデルとして、原始星からの距離がアウトフローの半径の 2 乗に比例する 2 次式を用いていた。しかし、このモデルでは原始星近傍 (100 au 程度) におけるアウトフローの形状を十分に説明できなかった。そこで、この領域では、アウトフローの形状は原始星からの距離がアウトフローの半径の

4 乗に比例するモデルを適用したところ、よく観測結果を表すことができることがわかった。これは原始星の近傍においてアウトフローは従来考えられてきたものより急速に広がった後にコリメートされるような形状であることを示す。この結果はアウトフローの流体シミュレーション結果の先行論文と矛盾しない。

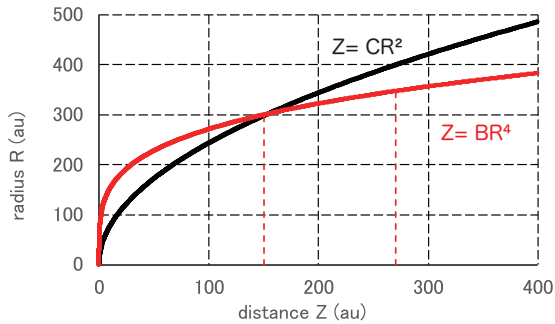


図 1.1.4: The fourth Power model and the conventional parabolic model of the L483 outflow. A horizontal axis represents the distance from the protostar along the outflow axis, while a vertical axis the radius of the outflow at a given distance.

#### 【中質量原始連星 NGC2264CMM3 のディスク・エンベロープ構造】

NGC 2264 CMM3A, CMM3B は太陽系から 738 pc の距離にある原始連星系天体である。以前の ALMA を用いた観測により、CMM3A では多くの有機分子輝線が検出される一方、CMM3B では有機分子輝線がほとんど検出されないことが報告されていた。ALMA による高空間分解能 ( $\sim 0.1''$ ) 観測の結果、CMM3A のダスト連続波放射がアウトフローと垂直方向に伸びた分布をしていることがわかった。この分布は 2 つのガウス分布の重ね合わせでよく説明することができた。2 つの分布は原始星周りのディスク構造と、その周りのエンベロープ構造を表していると考えられる。また、CMM3A, CMM3B のスペクトル指数  $\alpha$  が 2.5 程度と、星間物質のスペクトル指数 3.5-4.0 と比較して小さい値であることがわかった (図 1.1.5)。この原因としては、ダストの成長などに加えて、CMM3A, CMM3B の光学的厚みの影響が考えられる。また、CMM3A で検出される分子輝線の強度はディスク面上で低くなっていた。このことから、この天体のダストが光学的に厚いことが示唆される。CMM3B で有機分子輝線がほとんど検出されない理由も、光学的に厚いダストに輝線が隠されているためであると考えられる。

【Class I 原始星 Elias 29 において星形成が周辺環境に与える影響】 Elias 29 はへびつかい座にある Class I 後期の原始星であり、ALMA の観測データ (FAUST) の解析により周辺環境が明らかになった。C<sup>18</sup>O、SO ではアウトフローキャビティーのような構造が見られた。これは過去の論文の広域のアウトフローの方向と一致しており、初めて原始星近傍におけるアウ

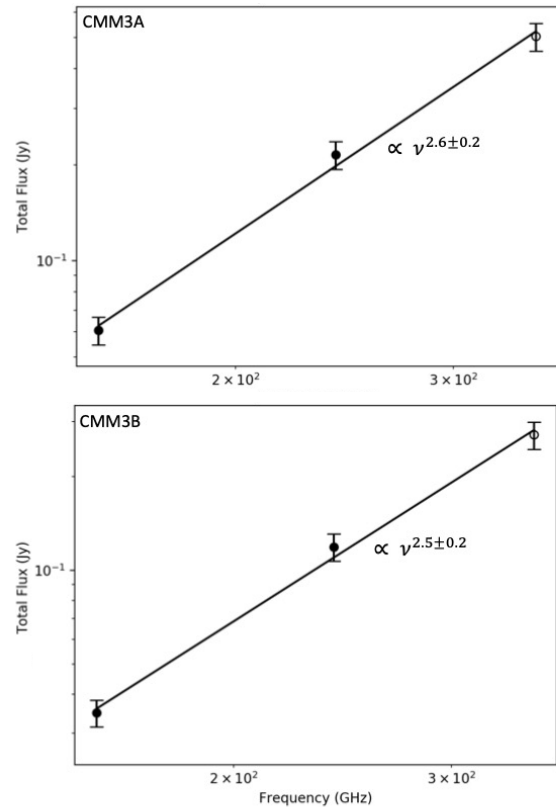


図 1.1.5: Spectral energy distribution (SED) of NGC 2264 CMM3A (upper panel) and CMM3B (lower panel).

トフロー構造を捉えることができた。また、原始星左側に赤方偏移したガスの小塊 (Blob) 構造が見つかった。この位置で速度が極めて高速度側に大きく変化しており、その形状からこの構造は bow-shock であると考えられる。さらに、原始星から南に 500 au 離れたところにあるリッジ構造の速度構造を解析したところ、非常に複雑な様相を呈しており、アウトフローキャビティーとの交点で両者の衝突が起こっていることが示唆された (図 1.1.6)。そのため、リッジ構造の化学組成には勾配が見られる。たとえば、この衝突位置で DCO<sup>+</sup> と H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> の柱密度の比 (重水素濃縮度) が極端に低くなっていることがわかった。これは、衝突による温度上昇を反映している可能性が高い。以上のように、Class I にも関わらずこの原始星はまだ活発に周辺環境が活発に変化していることがわかった。

#### 1.1.4 機械学習による観測データ解析

ALMA は卓越した分光能力を持っており、広い周波数範囲を一度に観測できる。そのため、天体によっては非常に多くのスペクトル線が観測される。これら

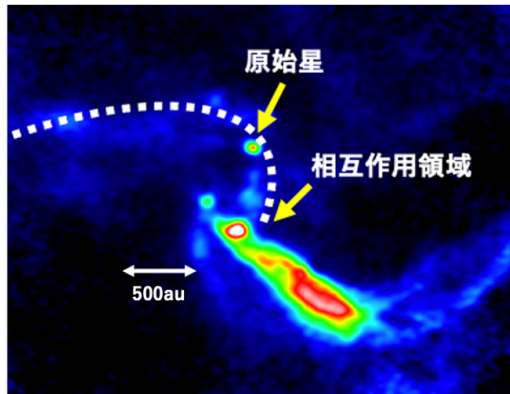


図 1.1.6: The ALMA image of the SO distribution around the protostar of Elias 29. A parabolic feature represents an outflow cavity, which interacts with the southern ridge component. This interaction is verified by a complex velocity structure of the ridge.

を総合的に解析し、物理構造や化学組成分布を明らかにするために、機械学習の導入を進めている。現在、教師あり機械学習として Support Vector Machine を、教師なし機械学習として Principal Component Analysis を用いた解析を行っている。さらに、これらを超えた方法論の開拓にも取り組みつつある。

#### 【機械学習を用いた分子ガスの速度構造の分類】

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。機械学習 (Support Vector Machine) を用いた解析を導入し、これら二種類の速度構造を分類する学習器を作成した。確率的勾配降下法を採用し、モデル計算による 3 次元の擬似観測データを用いて学習を行った結果、非常に高い正答率 (99.9%) での分類を実現した。この学習器を実際の ALMA 観測データに適用し、速度構造を分類した。その結果、デブリ円盤 49 Ceti で観測された CO 輝線と炭素原子 ([C I]) 輝線は、ケプラー回転円盤を捉えていることが支持された。この結果は過去の報告と矛盾しない。また、原始星天体 IRAS 16293-2422 で観測された 18 本の分子輝線を分類し、分子種によって異なる構造が捉えられていることがわかった。とくに、 $C^{17}O$  輝線は回転しながら落下するエンベロープガスを捉えていることが支持され、このことは以前に報告したカイニ乗検定による結果と一致する。

#### 【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 L483】

L483 は、Aquila Rift 領域にある dark cloud であり、その中に IRAS 18148-0440 という Class 0 低質量原始星が存在する。この天体は、数 1000 au ス

ケールで不飽和炭素鎖分子に恵まれ、数 10 au スケールで複雑な有機分子に恵まれるハイブリッドな化学組成の特徴を持つ。ALMA による観測で、原始星近傍において 23 種類の分子輝線を検出した。近年、観測性能の向上により、多くの分子輝線が検出されるようになり、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になってきている。そこで我々は、この天体の速度構造も含んだ 3 次元のデータに対して、機械学習の 1 つである主成分分析 (PCA) を行い、その有効性を確かめた。速度構造も含めた PCA によって、観測データを余すことなく活用し、化学組成分布の特徴を先入観なく分類できる。PCA の結果、生命前駆体分子の一つとして知られている  $NH_2CHO$  (フォルムアミド) の分布が他の有機分子と異なるなど、原始星近傍における化学組成進化の手がかりとなる傾向を捉えた (図 1.1.7)。この手法は、今後膨大な観測データの新たな手法として期待される。

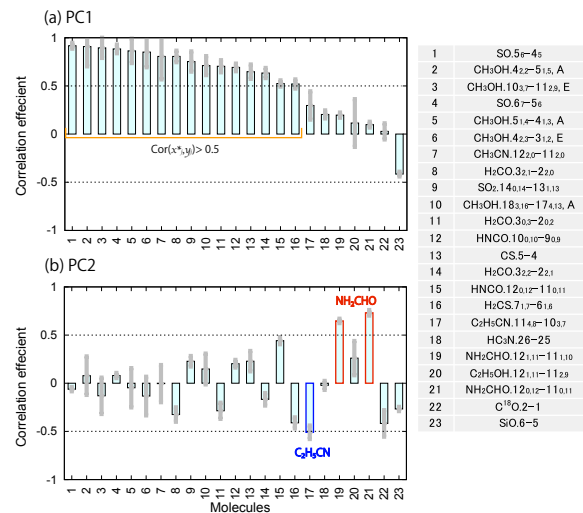


図 1.1.7: Correlation coefficients derived by the principal component analysis for the cube data observed toward L483. (a) Correlation coefficients of molecular lines with the first principal component (PC1). (b) Those with the second principal component (PC2).

#### <報文>

(原著論文)

- [1] Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., “Molecular Distributions of the Protostellar Envelope and the Outflow of IRAS 15398-3359: Principal Component Analysis”, *ApJ*, 900, 40 (2020)
- [2] Ebisawa, Y., Sakai, N., Menten, K.M., Oya, Y., & Yamamoto, S., “Temperature Structure of the

- Pipe Nebula Studied by the Intensity Anomaly of the OH 18cm Transition”. *ApJ*, 904, 136 (2020)
- [3] Oya, Y. & 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”, *The Astrophysical Journal*, 904, 185 (2020).
- [4] Okoda, Y., Oya, Y., Francis, L., Johnstone, D., Inutsuka, S., Yamamoto, S., & FAUST team members, “FAUST II. Discovery of a Secondary Outow in IRAS15398–3359: Variability in Outow Direction during the Earliest Stage of Star Formation?”, *ApJ*, 910, 11 (2021)
- (学位論文)
- [5] 柴山良希, 「ALMA による原始連星系天体 NGC 2264 CMM3 の化学・物理構造の探究」(修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演 (指定なきものは口頭)
- [6] Oya, Y., “Temperature Structure of the Pipe Nebula Studied by the Intensity Anomaly of the OH 18 cm”, *The Early Phase of Star Formation 2020*, July 12–17, 2020, Germany (Canceled)
- [7] Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., “Chemical and Physical Structures around the Very Low Mass Protostellar Source IRAS 15398–3359”, *The Early Phase. of Star Formation 2020*, July 12–17, 2020, Germany (Canceled)
- [8] Oya, Y., “Circumultiple/circumstellar Structures and Outflow near its Launching Point: the IRAS 16293–2422 Source A Case”, *Five years after HL Tau: a new era in planet formation*, December 7–11, 2020, Online
- [9] Okoda, Y., Oya, Y., Francis, L., Johnstone, D., Inutsuka, S., Yamamoto, S., & FAUST team members, “Dynamic Structure around the Protostar with a Key to Disk Formation”, *Five years after HL Tau: a new era in planet formation*, Virtual conference, Dec 7–11, 2020, Online
- [10] Oya, Y., “Circumultiple/Circumstellar Structures and Outflow near its Origin Point: the Multiple System IRAS 16293–2422 Source A Case”, *East Asian ALMA Science Workshop 2021*, February 17–19, 2021, Online
- 招待講演
- [11] Yamamoto, S., “Organic Molecules in Disk Forming Regions”, *43rd COSPAR Scientific Assembly*, F3.5, January 28 - February 4, 2021, Online
- (国内講演)
- [12] 大屋瑠子, 山本智, 「Class 0 低質量原始星天体 IRAS 16293–2422 Source A のアウトフロー構造」、P131a
- [13] Yuki Okoda, Yoko Oya, Logan Francis, Doug Johnstone, Shu-ichiro Inutsuka, Satoshi Yamamoto, and FAUST team members, 「Discovery of the Secondary Outow Structure in IRAS15398–3359」、P132a
- [14] 柴山良希, 渡邊祥正, 大屋瑠子, 山本智 「ALMA による原始星天体 NGC 2264 CMM3A の回転構造の検出」、P128a
- [15] 藤田孝典, 大屋瑠子, 山本智, 「Class 0 原始星 L483 の 40 au スケールのアウトフロー」、P134a
- [16] 雑賀恵理, 大屋瑠子, 山本智 「ALMA による Class I 原始星 Elias 29 のアウトフローの詳細構造」、P135a
- 【天文学会 2021 年春季年会、オンライン開催、2021 年 3 月】
- [17] 大屋瑠子, 癸生川博文, 三宅祥太, 山本智, 「ALMA 観測による高解像度 3 次元データ解析への機械学習の導入」、P101a
- [18] 大小田結貴, 阿部正太郎, 駒木彩乃, 大屋瑠子, 山本智, 「速度構造を含めた 3 次元データにおける Principal Component Analysis」、P102a
- [19] Saiga, E., Oya, Y., Miotello, A., Ceccarelli, C., Codella, C., Chandler, C., Sakai, N., Yamamoto, S., & FAUST Team Members 「Star Formation Feedback to a Parent Cloud: The Elias 29 Case」、P103a
- [20] 柴山良希, 渡邊祥正, 大屋瑠子, 坂井南美, Ana López-Sepulcre, Sheng-Yuan Liu, Yu-Nung Su, Yichen Zhang, 酒井剛, 廣田朋也, 山本智 「ALMA による原始連星系天体 NGC 2264 CMM3 の高分解能観測」、P111a
- 【その他の国内講演】
- [21] 大屋瑠子, 大小田結貴, 「極めて若い原始星天体に付随した円盤構造とその進化の観測的研究」、新学術領域「星惑星形成」大研究会、2020 年 9 月 30 日–10 月 3 日、オンライン開催
- [22] Yuki Okoda, Yoko Oya, Logan Francis, Doug Johnstone, Shu-ichiro Inutsuka, Satoshi Yamamoto, and FAUST team members, 「非常に若い超低質量原始星における第二のアウトフロー構造」、分子雲から原始星誕生までを追う 新時代の星形成モデル構築に向けて、2020 年 12 月、オンライン開催
- [23] 大屋瑠子, 「連星系 IRAS 16293–2422 A を取り巻く円盤構造と原始星円盤、およびアウトフローの関係」、惑星系形成若手研究会、2021 年 2 月 2 日–24 日、オンライン開催
- 招待講演
- [24] 山本智, 「物質をみること」、宇宙電波懇談会シンポジウム 2020 年度: 「極限性能で切り開く電波天文学」、2020 年 12 月 21 日–22 日、オンライン開催

# 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 ( $\sim 1000$  au) is indeed inherited in the disk forming region ( $\sim 100$  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. et al. 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).