

2 分野 A

2.1 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、銀河系および系外銀河における星・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、我々のグループでも以下に述べるように成果が出つつある。ALMA は既存装置よりも 2 桁高い感度と解像度を実現し、星・惑星系形成の理解を一挙に進展させつつある。

【テラヘルツ帯観測の開拓】

テラヘルツ帯は電波と赤外線との中間にあたり、観測的研究がまだ十分に進んでいない波長域である。そこには C^+ 、 N^+ などの原子スペクトル線の他、 CH 、 H_2D^+ 、 HD_2^+ などの基本的分子のスペクトル線がある。それらの観測により、星・惑星系形成における物質進化の根幹を捉えることができる。世界的には

2009 年に打ち上げられた Herschel 衛星によりテラヘルツ帯観測が進められた。本研究室では、それとは相補的に、開発してきたテラヘルツ帯受信機を、チリに設置されている国立天文台 ASTE 10 m 望遠鏡に搭載して試験観測を行ってきたが、望遠鏡の鏡面精度が十分でないことがわかり、現在では検出器の基礎研究に専念している。それと同時に、分子スペクトル線の静止周波数を測定するための分光装置への応用を目指している。なお、この研究は 2019 年度から大阪府立大学の前澤准教授に引き継ぐこととした。

2.1.1 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 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る。本研究室では、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。

ALMA を用いた観測研究

【低質量原始星 IRAS 18148-0440 アウトフロー】

IRAS 18148-0440 は、原始星コア L483 に含まれる Class 0 低質量原始星である。この原始星から南東-北西方向に向かって双極に噴き出すアウトフローの構造が、ALMA を用いた CCH と CS の分子輝線の観測によって捉えられた。アウトフローの速度構造は、放物面モデルでよく再現されることがわかった。さらに、アウトフローのキャビティーの壁における回転運動が示唆された。アウトフローガスのもつ比角運動量の大きさは、原始星を取り巻いて回転・落下するエンベロープガスのもつ比角運動量と同等か、2 倍程度と見積もられた。

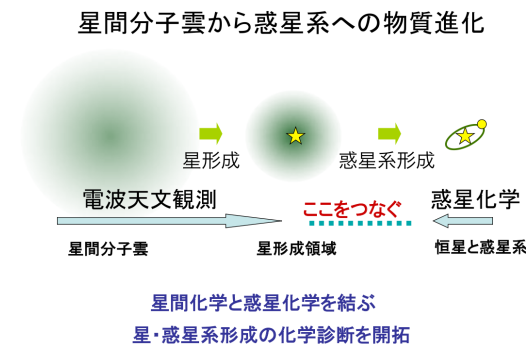


図 2.1.1: A schematic illustration of our goal

【Elias 29】

Elias 29 は、へびつかい座にある Class I 低質量原始星天体である。ALMA データの解析の結果、原始星を取り巻く 100 au スケールのガスに、SO 分子と SO₂ 分子が豊富に含まれることがわかった。一方 CS 分子輝線は、原始星を取り巻くガス成分では弱く、原始星から南に 500 au 離れた位置で強く検出された。SO 分子輝線の速度構造の解析によって、原始星まわりのガスの回転構造が捉えられた。

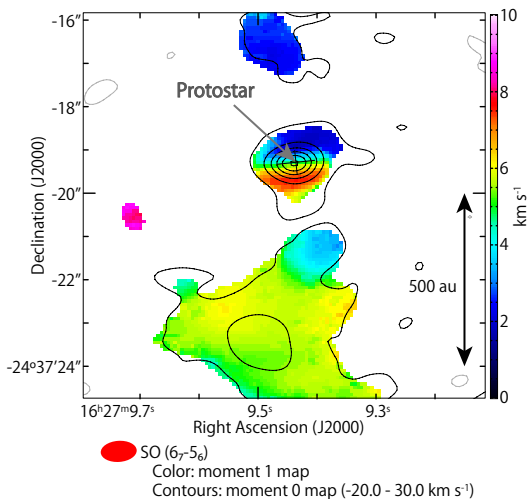


図 2.1.2: The integrated intensity map (contour) and the velocity map (color) of the SO line. The molecular gas is blue-shifted and red-shifted on the northern and southern side of the protostar, respectively.

【孤立した星形成領域：B335】

B335 は、孤立した星形成領域 Bok globule にある低質量 Class 0 天体として知られている。この天体は、原始星近傍で飽和有機分子に富むホットコリノの化学的性質を有することが知られている。この飽和有機分子の輝線を、ALMA を用いて高空間分解能 (0.1")

で観測することで、原始星近傍の非常に小さい回転構造 (3 au 程度) を検出することに成功した。この回転構造は、重力に従って回転しながら落下するガスの運動モデルで説明できることがわかった。さらに飽和有機分子の存在領域は分子の種類によって異なることがわかり、原始星近傍の回転落下運動に伴う化学変化が捉えられた。

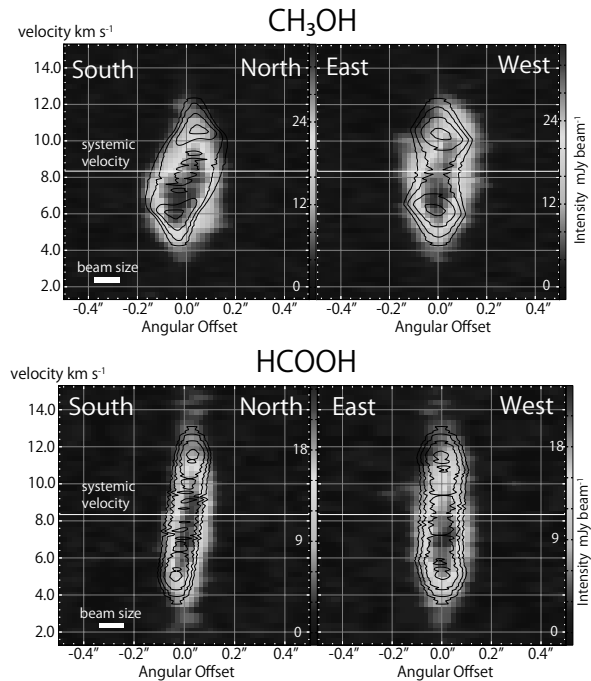


図 2.1.3: Position-velocity diagrams of CH₃OH and HCOOH emission. The kinematic structure traced by each molecule is explained by the infalling-rotating envelope model (black contours).

【星形成初期過程における原始星と円盤の共進化】

IRAS 15398-3359 は、おおかみ座にある Class 0 低質量原始星である。ALMA データの解析から、原始星質量が太陽質量の $0.007^{+0.004}_{-0.003}$ 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ことがわかった。一方、光度と線幅を指標に 3 つの天体について ALMA のアーカイブデータを解析した。光度が太陽の 0.1 倍以下と非常に小さい L328-IRS の原始星質量は、太陽質量の 0.2 倍と大きいことがわかった。光度が小さいという特徴に加え、線幅が 1 km s^{-1} 以下と狭い IRAM 04191-IRS と Chamaeleon-MMS1 の原始星質量は太陽質量の 0.1 倍以下である可能性を示した。これまでに報告されている天体 16 個と上記の天体の原始星と円盤の質量を比較すると、原始星が進化するにつれて円盤も共に進化している可能性が観測的に示唆される。

【低質量原始星 IRAS 15398-3359 周りの化学組成の分布】

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

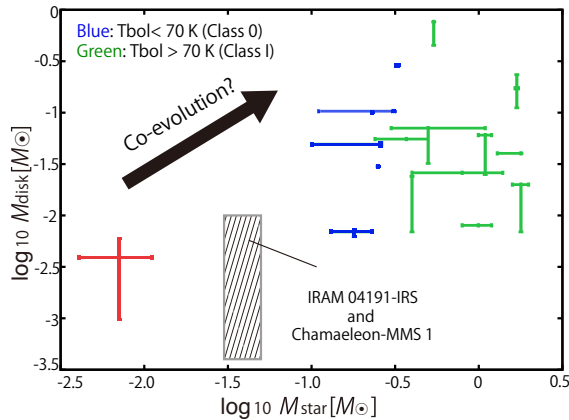


図 2.1.4: Comparison between the protostellar masses and the disk masses. They are for the sample of protostars in previous studies. The red marks with error bars represent IRAS 15398–3359. IRAM 04191-IRS and Chamaeleon-MMS1 are in the range of the oblique lines. The blue and green marks show the protostars of $T_{bol} < 70$ K (Class 0) and $T_{bol} > 70$ K (Class I), respectively. The error bars show the ranges of the mass.

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。これらの全分子輝線と連続波の原始星周りの強度分布図に対して主成分分析を行った。この手法は分子雲や系外銀河において分布の相関を扱う際に用いられるが、原始星周りにおいても有効であるかどうかを検証した。観測した分子輝線は原始星周りに広がる分布と原始星に集中する分布に分類され、この結果は実際の強度分布図と一致する。このように、主成分分析は原始星周りの分子を分布ごとに分類する方法として有効であることがわかった。

【原始星 L1527 における重水素濃縮度のマッピング】
低質量星形成領域 L1527 における H_2CO 分子と CCH 分子の重水素濃縮度 (ノーマル種に対する重水素化物の存在量比) を ALMA による観測から調べたところ、原始星から 1000 au 程度離れたエンベロープの外側で非常に高い一方 ($\text{D}_2\text{CO}/\text{H}_2\text{CO} = 0.81$, $\text{CCD}/\text{CCH} > 0.32$)、原始星近傍では低くなっていた ($\text{D}_2\text{CO}/\text{H}_2\text{CO} < 0.04$, $\text{CCD}/\text{CCH} < 0.016$)。エンベロープ外側では重水素濃縮度が進む条件が満たされていると考えられる。一方、重水素濃縮度が進行する以前の段階から星間塵上で作られた分子が気相中に昇華するため、原始星近傍では重水素濃縮度が低くなると考えられる。

【原始星 L1527 のアウトフロー】

おとし座分子雲にある Class 0/I 原始星 L1527 のアウトフローを観測した。観測装置は ALMA を用い、分子輝線は CS, H_2CO , $c\text{-C}_3\text{H}_2$, SO を用いた。その結果、CS 分子輝線がアウトフローのキャビティの壁をよくトレースしていることがわかった。また、アウ

トフローがエンベロープガスの角運動量を抜く機構の一つとして考えられている。そのため CS 分子輝線を用いてアウトフローの回転を見ることで比角運動量を評価した。その結果、アウトフローの回転を見ることはできなかったが、アウトフローの比角運動量がエンベロープのものと同程度以下であると見積もることができた。

単一口径望遠鏡を用いた観測研究

【ペルセウス座分子雲における D 化物分子サーベイ】
IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いて、HNC 分子の重水素濃縮度 (DNC/HNC) を、ペルセウス座分子雲の Class 0/I 段階の低質量原始星 34 天体で統計的観測し比較した。その結果、原始星誕生後の重水素濃縮度は「星なしコア」時代の長短よりも、むしろ、原始星誕生後の進化段階を反映すると考えられている星の bolometric temperature に対し強い負の相関をもつことがわかった。また、原始星誕生後の HNC の重水素濃縮度の変化の速度を、イオン分子 (N_2H^+) の重水素濃縮度と比較すると、中性分子の HNC の方がゆっくり減少していることがわかった。これは、中性分子とイオン分子と反応性の違いとして理解できる。

【OH 18 cm 線の強度異常における遠赤外線の影響の解析】

OH 分子の 18 cm 線は、4 本の超微細構造遷移線 (1612, 1665, 1667, 1720 MHz) に分かれている。おとし座の HCL2 領域の直線構造において、OH 18 cm 線を観測したところ、1720 MHz 線が宇宙背景放射に対する吸収線として検出された。この現象は通常の統計平衡励起計算では再現できない。そこで、その起源を調べるために、星間塵の遠赤外線放射の影響を考慮した統計平衡励起計算を行った。その結果、星間塵の温度が 80 K のとき、温度が低く (< 30 K)、柱密度が高い ($> 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) 場合に吸収線を再現することができた。即ち、1720 MHz 線の吸収線は、温かいガスに囲まれた、比較的密度が高く冷たい領域をトレースすることがわかった。

【Pipe nebula における OH 18 cm 線の観測】

へびつかい座の分子雲 Pipe nebula は、南北方向に特徴的な直線構造を示している。この起源として、近傍の恒星 θ -Ophiuchi からの紫外線放射の影響や、東西方向に伸びる別のフィラメントとの衝突などが考えられている。これらを検証するため、Pipe nebula において OH 18 cm 線の観測を行い、ガスの運動温度を調べた。その結果、 θ -Ophiuchi からの距離と運動温度の間に相関は見られなかった。一方、2 つのフィラメントの境界領域では、1665 MHz 線と 1667 MHz 線の吸収線が検出された。この吸収線は、運動温度がおよそ 70 K 以上であることを示しており、2 つのフィラメントの衝突を反映していると考えられる。

2.1.2 テラヘルツ帯観測技術の開拓

テラヘルツ帯における観測を行うためには、そこで動作する低雑音の周波数混合器（ヘテロダインミキサ）の開発が不可欠である。そのための最も有力なデバイスは超伝導ホットエレクトロン・ポロメータ（HEB）ミキサ素子である。HEB ミキサ素子は電磁波吸収による超伝導状態の破壊を利用し、受信信号と局部発振信号の「うなり」中間周波信号に伴う電力変化をバイアス電流の変化として検知するものである。そのためには、超伝導体をサブミクロンサイズにすること、そして、素子内に生じた熱電子を「うなり」の周期よりも早く冷却し、超伝導状態を回復させる必要がある。この冷却メカニズムには、(1) 熱電子の拡散によって電極に逃がす方法（拡散冷却）と、(2) フォノンとの相互作用を介して基板に逃がす方法（格子冷却型）がある。本研究室では、主に NbTiN や NbN を用いた「格子冷却型」HEB ミキサ素子の開発研究を進めている。本年度は、作成した 0.9 THz 帯の HEB ミキサを理研の実験室分子分光装置に装着し、スペクトルの測定に成功した。また、実験室分子分光装置の改良を進めた。

【HEB ミキサを用いた実験室分子分光】

製作した HEB ミキサ素子を用いて 0.9 THz 帯の ALMA 型カートリッジ受信機を構成し、理化学研究所の実験室分子分光システムに搭載した。それを用いて、HDO 分子の $1_{11} - 0_{00}$ 輝線 (893.639 GHz) と $2_{02} - 1_{01}$ 輝線 (919.311 GHz) および、 D_2O 分子の $2_{12} - 1_{01}$ 輝線 (897.947 GHz) の測定に成功した。このことから、HEB ミキサが分光測定に十分用いることができることがわかった。測定されたスペクトルの形は、通常の放射スペクトルと周波数がずれた吸収スペクトルを合わせた形状を示していた。その効果は HDO 分子の $1_{11} - 0_{00}$ 輝線で顕著であった。その理由はまだ解明できていないが、装置上の原因も含めて検討中である。

【分子分光装置】

ALMA などの観測で検出される未同定線を特定するために、理化学研究所坂井星・惑星形成研究室で分子分光装置 SUMIRE (Spectrometer Using superconductor Mixer Receiver) の開発を進めている。今年度は 4 台のデジタル分光計を使い、受信機の全 IF 帯域 (USB と LSB の合計 8 GHz) を同時測定できるように拡張した。また、ルビジウム原子時計を周波数基準として導入し、周波数の絶対精度を向上させた。CH₃OH の測定では、データベースのモデルスペクトルを再現するとともに (図 2.1.5)、データベースに記載されていない高励起の輝線を検出することに成功した。

<受賞>

- [1] 大屋瑤子、「数 10 au スケールで見た若い低質量原始星天体の物理的・化学的構造」、第 35 回 (2018 年度) 井上研究奨励賞

<報文>

(原著論文)

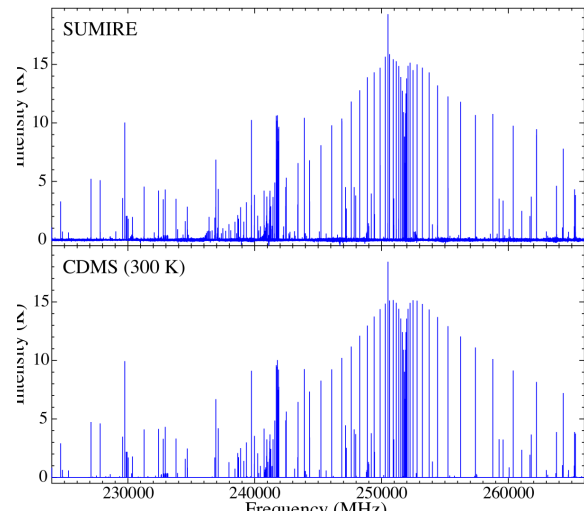


図 2.1.5: (Top) Spectrum of CH₃OH measured with SUMIRE. (Bottom) Model spectrum based on CDMS at temperature of 300 K.

- [2] Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., López-Sepulcre, A., Ceccarelli, C., Lefloch, B., & Yamamoto, S., “Sub-arcsecond Kinematic Structure of the Outflow in the Vicinity of the Protostar in L483”, *ApJ*, 863, 72 (14pp) (2018)
- [3] Ebisawa, Y., Sakai, N., Menten, K. M., & Yamamoto, S., “The Effect of Far-infrared Radiation on the Hyperfine Anomaly of the OH 18 cm Transition”, *ApJ*, 871, 89 (29pp) (2019)
- [4] Yoshida, K., Sakai, N., Nishimura, Y., Tokudome, T., Watanabe, Y., Sakai, T., Takano, S., & Yamamoto, S. “An unbiased spectral line survey observation toward the low-mass star-forming region L1527”, *Pub. Astron. Soc. Japan*, Advance online publication on 10 January 2019
- [5] Imai, M., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Higuchi, A., Zhang, Y., Oya, Y., Watanabe, Y., Sakai, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., & Yamamoto, S., “Deuterium Fractionation Survey Toward Protostellar Sources in the Perseus Molecular Cloud: HNC Case”, *ApJ*, 869, 51 (25pp) (2018)
- [6] Imai, M., Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., “Unveiling a Few Astronomical Unit Scale Rotation Structure around the Protostar in B335”, *Astrophysical Journal Letters*, 873, L21 (7pp) (2019)
- [7] Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Jørgensen, J. K., van Dishoeck, E., & Yamamoto, S., “The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages: The Case of the Very-low-mass Protostar IRAS 15398–3359”, *ApJL*, 864, L25 (7pp) (2018)

(学位論文)

- [8] 海老澤勇治, “Exploring Molecular-Cloud Formation Using the Intensity Anomalies of the OH 18 cm Transition” (博士論文)
- [9] 吉田健人, “Evolution of Molecular Isotopic Ratios in the Low Mass Protostar L1527” (博士論文)
- [10] 大小田結貴, 「星形成初期過程における原始星と円盤の共進化」 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演 (指定なきものは Oral)

- [11] Oya, Y., “Three Cases of Chemical Differentiation in Disk-Forming Regions of Low-Mass Protostellar Sources”, The Early Phase of Star Formation 2018, Germany, May 13–18, 2018
- [12] Oya, Y., “Unified Picture of Chemical Differentiation in Disk-Forming Regions of Low-Mass Protostellar Sources”, Astrochemistry Workshop, Japan, June 25–26, 2018
- [13] Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Sakai, T., Hirota, T., & Yamamoto, S., “Chemical Characteristics of Prototypical Isolated Protostar in B335”, NOEMA/30m Workshop, NAOJ, Mitaka, July 24–25, 2018
- [14] Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Jørgensen, J. K., van Dishoeck, E., & Yamamoto, S., “High resolution observations of forming disks; Very-Low-Mass Protostellar case”, JCMT team meeting, Tokyo, Japan, August 1–2, 2018
- [15] Ebisawa, Y., Sakai, N., Menten, K. M., & Yamamoto, S., “Exploring molecular-cloud formation in the Pipe Nebula with the OH 18 cm transition”, Interstellar Filament Paradigm on their formation, evolution, and role in star formation, Nagoya University, November. 5–9, 2018 (poster)

【IAU Symposium 345: Origins: From the Protosun to the First Steps of Life, Vienna, Austria, August 20–23, 2018】

- [16] Oya, Y., “Unified Picture of Chemical Differentiation in Disk-Forming Regions of Low-Mass Protostellar Sources”,
- [17] Yoshida, K., Sakai, N., & Yamamoto, S. “Anomalous distributions of deuterated formaldehyde in the low-mass protostar L1527” (poster)

【Workshop on Interstellar Matter 2016, Sapporo, Japan, 2018年11月14日–16日】

- [18] Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Ceccarelli, C., Lefloch, B., and Yamamoto, S., “Elias 29: a Class I Low-Mass Protostellar Source Rich in S-bearing Species”

- [19] Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., “Innermost Envelope Structure of B335 Traced by Complex Organic Molecules”,
- [20] Ebisawa, Y., Sakai, N., Menten, K. M., & Yamamoto, S., “Exploring molecular-cloud formation in the Pipe Nebula with the OH 18 cm transition” (poster)
- [21] Yoshida, K., Sakai, N., & Yamamoto, S. “Mapping observations of deuterated species toward the low-mass protostar L1527 with ALMA” (poster)
- [22] Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Jørgensen, J. K., van Dishoeck, E., & Yamamoto, S., “The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages” (Poster)
- [23] Fujita, T., Oya, Y., Yamamoto, S., Sakai, N., “Molecular Distributions in the Outflow of L1527” (poster)

(国内会議)

一般講演

- [24] 大屋瑤子, 「低質量原始星の原始惑星系円盤形成に伴う化学組成の変化」, 生命関連分子地球外運搬ワークショップ、国立天文台、2018年10月22日–23日
- [25] 大小田結貴, 大屋瑤子, 坂井南美, 渡邊祥正, 山本智, 「The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages」, ALMA ワークショップ: 円盤から太陽系へ、WTC Conference Center Tokyo, 2018年11月21日–11月22日

【天文学会 2018 年秋季年会、兵庫県立大学、2018 年 9 月 19 日–21 日】

- [26] 大屋瑤子, 山本智, 坂井南美, Ana López-Sepulcre, 「Class I 低質量原始星天体 Elias 29 における円盤/エンベロープ構造の解析」, P103a
- [27] 海老澤勇治, 坂井南美, Karl Menten, 山本智, 「Pipe nebula における分子雲形成の研究 II」, P125a
- [28] 吉田健人, 坂井南美, 山本智, 「星形成領域 L1527 における炭素鎖分子 CCH の重水素化物の ALMA 観測」, P114a
- [29] 今井宗明, 坂井南美, Ana López-Sepulcre, 大屋瑤子, 渡邊祥正, 山本智, 「B335 における原始星近傍エンベロープガスの回転構造」, P108a
- [30] 大小田結貴, 大屋瑤子, 坂井南美, 渡邊祥正, 山本智, 「初期進化段階にある円盤構造を付随した超低質量原始星の探査」, P107a

【天文学会 2019 年春季年会、法政大学、2019 年 3 月 14 日–17 日】

- [31] 大屋瑤子, 山本智, 坂井南美, Ana López-Sepulcre, 「Class I 低質量原始星天体 Elias 29 における 100 au スケールでの化学組成」, P130a
- [32] 今井宗明, 坂井南美, Ana López-Sepulcre, 大屋瑤子, 渡邊祥正, 山本智, 「B335 の原始星近傍ガスの物理・化学構造」, P132c (ポスター)

- [33] 大小田結貴、大屋瑤子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「低質量原始星 IRAS 15398-3359 のアウトフローの化学組成」, P131a
- [34] 藤田孝典、大屋瑤子、山本智、坂井南美、「Class 0/I 低質量原始星コア L1527 のアウトフローの分子分布と速度構造」, P107b (ポスター、口頭)

その他

- [35] 大小田結貴、「BBC 100 Women, 2018」に選出

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.

In parallel to such observational studies, we are developing a hot electron bolometer mixer (HEB mixer) for the future terahertz astronomy. We are fabricating the phonon cooled HEB mixer using NbTiN and NbN in our laboratory. The receiver equipped with this HEB mixer is now used for laboratory spectroscopy of interstellar molecules at RIKEN in collaboration with Dr. Nami Sakai.

- [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).