

## 0.1 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、このような独創的視点を軸に、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」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）の本格的稼働】

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) A 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、 $CH$ ,  $H_2D^+$ ,  $HD_2^+$  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、チリに設置されている ASTE 10 m 望遠鏡による高分解能観測を目指しており、2013 年度には、これまでに開発してきたテラヘルツ帯受信機を搭載して試験観測を行った。本研究室は、1998 年から 2005 年まで、富士山頂に口径 1.2 m のサブミリ波望遠鏡を設置、運用した実績がある。この経験を発展させて、テラヘルツ分子観測を進めている。

## 0.1.1 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。

### 星間分子雲から惑星系への物質進化



図 0.1.1: A schematic illustration of our goal

### 【低質量原始星 IRAS 16293-2422】

IRAS 16293-2422 は、へびつかい座にある Class 0 原始星の連星系 (Source A, B) であり、複雑な飽和有機分子を多く含む hot corino 天体の代表例として活発な研究対象となっている。ALMA のアーカイブデータの解析の結果、Source A において、エンベロープガスの回転落下運動が明瞭に捉えられた。その速度構造は回転しながら落下するガス円盤のモデルで再現された。Source A に比べて運動が明らかでないものの、Source B での速度構造も同様のモデルで説明された。また Source A, B どちらにおいても、分子種によって捉えられる成分が異なり、エンベロー

ブからその内側の原始星円盤にかけて劇的な分子組成の変化が見られた(図 0.1.2)。特に、遠心力バリア付近に  $\text{CH}_3\text{OH}$  や  $\text{HCOOCH}_3$  などの有機分子が局在していることがわかった。

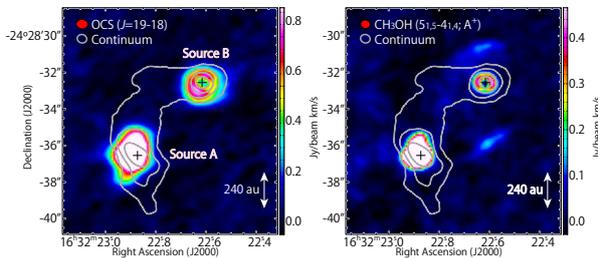


図 0.1.2: Integrated intensity maps of OCS ( $J=19-18$ ; the left panel) and  $\text{CH}_3\text{OH}$  ( $5_{1,5}-4_{1,4}, A^+$ ; the right panel). The contours represent the 1.3 mm continuum map.

#### 【ホットコアを擁する WCCC 天体 : L483】

L483 は低質量 Class 0 原始星を擁する原始星コアである。この天体の数 1000 AU スケールでの分子組成は、炭素鎖分子を豊富に含む WCCC 天体の特徴を示すことが知られている。ALMA を用いて  $0.5''$  (100 AU) の分解能で観測した結果、炭素鎖分子の一種である CCH や  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  の分布が数 100 AU スケールでも見られ、WCCC 天体の特徴が確認された。一方で、原始星近傍の数 10 AU スケールの領域には、 $\text{HCOOCH}_3$  や  $\text{NH}_2\text{CHO}$  などの大型飽和有機分子が検出された。これらの分子は hot corino 天体に特有のものであることから、この天体は hot corino の性質を内部に併せ持つ WCCC 天体と言える。このような中間的な分子組成を持つ天体の存在は数 1000 AU スケールでは示唆されていたが、本研究により高分解能観測で初めて捉えられた。

#### 【低質量星形成領域における硫黄を含む分子】

Hot corino 天体を中心とした 12 の天体に対して、硫黄原子 (S) を含む分子輝線のサーベイ観測を実施した。この結果、CS, SO,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ , OCS といった様々な S 関連分子の輝線が検出された。とくに、ペルセウス座にある Class 0 原始星 IRAS 2A、へび座にある Class 0 原始星 SMM1 などで、 $\text{H}_2\text{CS}$  や OCS などの S 関連分子が豊富であることがわかった。これまで CS や SO の輝線が多く为天体で強く検出されることが知られていたが、その他の S 関連分子の振る舞いは系統的に調べられてこなかった。これらの分子輝線を、これほど多くの天体に対して観測したのは初めてであり、星形成領域の S 関連化学過程の理解において重要な成果である。

#### 【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。本研究では、この天体に対して、ALMA による高分解能観測 ( $0.5''$ ) を行った。その結果、 $\text{HCOOCH}_3$  や  $\text{CH}_3\text{CHO}$  などの多くの大型飽和有機分子を検出し、さらにその存在量を他の天体と比較したところ B335 が hot corino 天体を有することを初めて発見した。B335 ではエンベロープに明瞭な回転運動はみられないが、原始星近傍の数 10 AU 程度のコンパクトな領域に存

在する大型飽和有機分子は広い速度幅をもつ。これは、これらの分子が原始星近傍まで落下運動を続けている可能性を示唆する。

#### 【ペルセウス座分子雲における D 化物分子サーベイ】

「星なしコア」時代の時間の長短を反映すると考えられてきた重水素濃縮度 (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 天体で統計的に比較した。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、DNC や HNC の存在量は水素分子密度が高い天体で低くなっており、これらの分子が星の進化によって、原始星近傍で破壊されている可能性が考えられる。

#### 【原始星 L1527 における $\text{H}_2\text{CO}$ および $\text{D}_2\text{CO}$ 】

おうし座分子雲にある原始星 L1527 に対して  $\text{H}_2\text{CO}$  および  $\text{D}_2\text{CO}$  分子を ALMA を用いて観測した。その結果、 $\text{H}_2\text{CO}$  が原始星近傍に集中して存在するのに対し、 $\text{D}_2\text{CO}$  は高速度成分を持たず、原始星近傍には存在しないことがわかった。 $\text{D}_2\text{CO}$  は主に星間塵上で生成され気相中に蒸発すると考えられている。 $\text{D}_2\text{CO}$  が存在する領域は原始星から遠く温度が低いいため、 $\text{D}_2\text{CO}$  は非熱的プロセスで蒸発していると考えられる。このように、 $\text{H}_2\text{CO}$  の重水素化物の分布を調べることで、原始星コア内部における分子生成の起源を探ることができることを示した。

#### 【 $\text{H}_2\text{CO}$ の $^{13}\text{C}$ 同位体存在量比】

IRAM 30 m 望遠鏡を用い、星なしコア L1544 と原始星 L1527 に対して  $\text{H}_2\text{CO}$  の  $^{13}\text{C}$  同位体と  $^{18}\text{O}$  同位体種の観測を行い、 $\text{H}_2\text{CO}$  の  $^{13}\text{C}$  同位体存在量比を詳細に調べた(図 0.1.3)。その結果、どちらの天体においても、 $\text{H}_2\text{CO}$  の  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比が元素の同位体比 (60-70) と同程度であることがわかった。 $\text{H}_2\text{CO}$  の  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比が高ければこの分子が気相中で生成されると予想されるが、今回の結果は、 $\text{H}_2\text{CO}$  が星間塵上で CO から作られていることを示唆する。

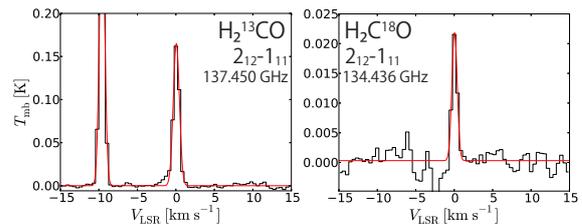


図 0.1.3: The detected spectral lines of  $\text{H}_2^{13}\text{CO}$  and  $\text{H}_2\text{C}^{18}\text{O}$  in L1527.

#### 【分子雲における OH 18 cm 線の強度異常】

おうし座分子雲の HCL2 領域は北部に特徴的な直線構造を形成している。ここで OH 18 cm 線の観測を行った。この遷移は 4 本の超微細構造遷移線 (1612, 1665, 1667, 1720 MHz) に分かれており、最近我々はこの 4 本の強度からガスの温度を決定できることを示した。直線構造において、線幅の細い成分と広い成分の 2 つの速度成分が検出され、線幅の細い成分では、1720 MHz 線が吸収線として検出された。この吸収線はこれまで用いてきた LVG 計算では再現す

ることができなかったが、星間塵の遠赤外線放射を考慮することで程度再現することができた。また、計算の結果、1720 MHz の吸収線は温かい ( $> 50$  K) ガスに囲まれた高柱密度 ( $> 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) かつ低温 ( $< 30$  K) のガスをトレースすることがわかった。これは、HCL2 領域の直線構造では分子雲形成が起きている可能性を示唆している。

#### 【おうし座分子雲における [C I] 観測】

OH 18 cm 線の 1720 MHz 線が吸収線として検出された HCL2 領域北部の直線構造において、炭素原子の微細構造遷移線 ([C I]) の観測を行った。[C I] のスペクトルは OH 18 cm 線と同様に線幅の広い成分と細い成分の 2 成分が検出された。特に、線幅の広い速度成分のスペクトルは OH とよく似ていた。星間紫外線の影響をうける雲の密度の薄い領域では、CO の光解離によって [C I] が強くなることが知られている。このように光が当たる領域は温度も高いと考えられるため、[C I] と OH のスペクトルが似ていることは、OH が希薄で温かいガスをトレースするという、これまでの我々の研究結果と矛盾しない。

#### 【NGC 2264 CMM3】

NGC 2264 CMM3 は太陽系近傍の若い大質量星原始星候補天体である。我々は、CMM3 に対して ALMA を用いてラインサーベイ観測を実施した。観測の結果、CMM3 には新たに 2 つの連続波ピークが検出され、連星系であることがわかった。さらに、それぞれの原始星の位置のスペクトルパターンは大きく異なることが示された (図 0.1.4)。この違いの原因としては、原始星の進化段階、質量、さらにダストの光学的厚さの違いが考えられる。

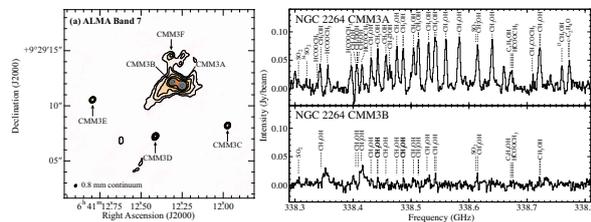


図 0.1.4: (Top) 0.8 mm continuum image of NGC 2264 CMM3 observed with ALMA. (Bottom) Spectra of CMM3A and CMM3B.

### 0.1.2 系外銀河の分子組成

系外銀河における分子組成は主に活動銀河核や爆発的星形成領域をもつ中心核を観測対象として、中心核活動性と分子組成の関連がこれまで議論されてきた。ALMA 時代に突入した現在、系外銀河の円盤部分に存在する通常の分子雲においても様々な分子の検出が可能になりつつある。一方で、ALMA の空間分解能であっても、多くの系外銀河では数 pc を切る空間分解能で観測することは不可能である。1 pc 程度を超える系の分子組成を議論する場合、系内の分子雲コアの観測から得られた概念をそのまま適用することはできない。そのため、活動銀河核などを伴わない通常の分子雲の大きなスケールで観測される化学組成の持つ意味と起源を明らかにすることが、

系外銀河における化学組成を議論する上で求められている。このような現状を踏まえ、本研究室では以下の研究を推進している。

#### 【M83】

近傍の棒渦巻銀河 M83 の渦状腕領域とバー領域を ALMA で観測した。観測の結果、 $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$ 、CCH、HCN、HNC、 $\text{HCO}^+$ 、CS、 $\text{CH}_3\text{OH}$  などの分子輝線を検出した。渦状腕とバーの化学組成を比較したところ、 $\text{CH}_3\text{OH}$  の水素に対する存在量がバーで高いことを見出した。バーでは渦状腕と比較して分子輝線の線幅が広いこと、この違いの原因として分子雲スケールのガスダイナミクスの違いが考えられる。

#### 【NGC6822】

低重元素量環境にある分子雲では、星間塵の量や星間輻射場の違いから、太陽系近傍とは質的に異なる化学組成が見られる。低重元素量の矮小銀河 NGC6822 に対して行った 3 mm 帯ラインサーベイ観測では、CCH、 $\text{HCO}^+$ 、HCN、CS の輝線を検出するとともに、他の矮小銀河で見られる輝線強度パターンと比べ  $^{13}\text{CO}(J=1-0)$  が特徴的に弱い可能性を見出した。この化学組成の背景にある物理状態を調べるため、ASTE 10 m 望遠鏡で  $^{12}\text{CO}(J=3-2)$ 、 $^{13}\text{CO}(J=3-2)$  を、野辺山 45 m 望遠鏡で  $\text{H}_2\text{CO}(1_{01}-0_{00})$  を観測した。 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$  の輝線強度の異常は、 $^{13}\text{CO}$  の分布が  $^{12}\text{CO}$  とは異なることに起因する可能性があり、今後さらに調査したい。

#### 【W51】

銀河系内の分子雲スケールの化学組成を調べるために、W51 を Mopra 望遠鏡を用いてマッピング観測 ( $40 \text{ pc} \times 50 \text{ pc}$ ) を行なった。観測領域全体を平均したスペクトルには、W51 内のホットコアに見られる高励起輝線や複雑な有機分子は見られない。一方で、M51 の渦状腕のスペクトルは W51 の平均したスペクトルと良く似ている。これは、系外銀河で観測されるスペクトルは、分子雲全体に広がった成分の寄与が卓越していると考えられる。

#### 【W3(OH)】

銀河系内の巨大分子雲 W3(OH) をターゲットに、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて  $9.0 \text{ pc} \times 9.0 \text{ pc}$  の広域マッピングラインサーベイ観測を行った。 $9.0 \text{ pc}$  四方で空間平均したスペクトルでは、ホットコアのスペクトルと比べ、コアとその近傍に存在する分子種 ( $\text{HC}_3\text{N}$ 、 $\text{CH}_3\text{CCH}$  など) の輝線強度が相対的に弱くなる一方、希薄ではあるものの分子雲全体に渡って存在する分子種 (CCH) の相対強度が強くなるという特徴が見られた。このことは、分子雲スケール ( $\sim 10 \text{ pc}$ ) の観測では空間的に広がったガス成分がスペクトルに強く反映されることを示唆している。また、系外銀河で観測されるスペクトルも大局的にはこの空間平均スペクトルと類似しており、系外銀河のスペクトルでも空間的に広がったガス成分の寄与が大きいと考えられる。

### 0.1.3 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 (ヘテロダイナミ

クサ)の開発が不可欠である。そのための最も有力はデバイスが超伝導ホットエレクトロン・ポロメータ(HEB)ミクス素子である。HEBミクス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)がある。本研究室では、主にNbTiNやNbNを用いた「格子冷却型」HEBミクス素子の開発研究を進めている。

#### 【1.9 THz HEB ミクサの開発】

惑星・地球大気のテラヘルツセンシングを見据え、ホーン/導波路型の1.9THz超伝導NbTiN-HEBミクス素子を開発した。水晶基板に集積した素子は、厚み18 $\mu\text{m}$ まで研磨した後、ダイシング装置を用いて幅36 $\mu\text{m}$ に細断した。このチップ化後も、素子は設計通り、良好な非線形IV特性を保持することを確認した。研磨の厚みの制御とダイシング時の歩留り向上が今後の課題である。本研究は大阪府立大学の前澤裕之准教授との共同研究である。

#### 【THz帯実験室分子分光計の開発】

本研究室で開発したTHz受信機を応用した分子分光実験を行うための実験室分子分光システムの開発を理化学研究所で開始している。これは、長さ2mのガラスセルに低圧で充填した試料気体分子からの放射を受信機で観測することで、回転スペクトル線の静止周波数を精度よく測定し、天文観測データの解析における分子種の同定や速度構造の議論に供することを目的としている。現在、実験装置全体の組み立てが完了し、最初の測定を開始する直前の段階である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, N., Furuya, R., Saruwatari, O., & Yamamoto, S., “The Role of SiO As a Tracer of Past Star Formation Events: The Case of the High-Mass Protocluster NGC2264-C”, *Astrophysical Journal*, 822, 85 (2016)
  - [2] Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Favre, C., & Yamamoto, S., “Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293-2422 Source A Studied with ALMA”, *ApJ*, 824, 88 (2016)
  - [3] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., “Spectral Line Survey toward a Molecular Cloud in IC10”, *ApJ*, 829, 94 (2016).
  - [4] 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., “Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335”, *ApJL*, 830, L37 (2016)
  - [5] Sakai, N., Oya, Y., Higuchi, A.E., Aikawa, Y., Hanawa, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, T., Hirota, T., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., & Yamamoto, S., “Vertical Structure of the Transition Zone from Infalling Rotating Envelope to Disc in the Class 0 Protostar, IRAS 04368+2557”, *MNRAS*, 467, L76-L80 (2017)
  - [6] Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Higuchi, A.E., Hirota, T., López-Sepulcre, A., Sakai, T., Aikawa, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., & Yamamoto, S., “L483: Warm Carbon-chain Chemistry Source Harboring Hot Corino Activity”, *ApJ*, 837, 174 (2017)
- (学位論文)
- [7] 西村優里, “Effect of Low-Metallicity on Molecular-Cloud Chemical Composition: the Case of Local Dwarf Galaxies” (博士論文)
  - [8] 今井宗明, “低質量原始星天体の化学的多様性を生み出す環境要因の探究”(修士論文)
- (著書)
- [9] Yamamoto, S., “Introduction to Astrochemistry”, Springer, 2017
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [10] Oya, Y., “Infalling-Rotating Envelopes and Disks around Low-Mass Protostars”, The Early Phase of Star Formation 2016, Ringberg Castle, 2016年6月26日-7月1日(口頭)
  - [11] Yoshida, K., Sakai, N., Watanabe, Y., Lefloch, B., Ceccarelli, C., & Yamamoto, S., “Molecular isotopic ratios in the low-mass protostar L1527” Fractionation of isotopes in space: from the solar system to galaxies, Arcetri Astrophysical Observatory, 2016年10月10日-10月13日(口頭).
  - [12] Ebisawa, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Menten, K., & Yamamoto, S., “Exploring Molecular-Cloud formation with OH 18 cm transition”, The Hydride Toolbox 2016, UPMC, Paris, 2016年12月12-15日
- 【Star Formation in Different Environments 2016, Quy Nhon, Viet-nam, 2016年7月25-29日】
- [13] Ebisawa, Y., Sakai, N., Menten, K., & Yamamoto, S., “Exploring Molecular-Cloud formation with OH 18 cm transition”,
  - [14] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., “Spectral Line Survey toward Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud”(口頭),

- 【Half a Decade of ALMA: Cosmic Dawns Transformed, Renaissance Indian Wells Resort & Spa Indian Wells, CA, USA, 2016年9月20日-23日】
- [15] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., “Chemical Composition in Low-Metallicity Dwarfs: Spectral Line Survey Observations toward the Large Magellanic Cloud and IC10” (口頭)
- [16] Watanabe, Y., Nishimura, Y., Sakai, N., Sorai, K., Harada, N., & Yamamoto, S., “CH<sub>3</sub>OH Enhancement in the Bar of M83 Observed with ALMA”,
- 【Workshop on Interstellar Matter 2016, Sapporo, Japan, 2016年10月19日-21日】
- [17] Ebisawa, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Menten, K., & Yamamoto, S., “Exploring Molecular-Cloud formation with OH 18 cm transition”
- [18] Chiba, Y., Sakai, N., Ebisawa, Y., Yoshida, K., Sakai, T., Watanabe, Y., & Yamamoto, S. “A new terahertz emission spectrometer at RIKEN”
- [19] Nishimura, Y., Watanabe, Y., Harada, N., Shimonishi, T., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., “Molecular-Cloud-Scale Chemical Composition: Mapping Spectral Line Survey toward W3(OH)”
- [20] Yoshida, K., Tokudome, T., Sakai, N., Watanabe, Y., Takano, S., & Yamamoto, S., “Spectral Line Survey Observation toward Low-mass Star-forming Region L1527 with Nobeyama 45-m Telescope”
- [21] Watanabe, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Sakai, T., Hirota, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., & Yamamoto, S., “Spectral Line Survey toward NGC 2264 CMM3 with ALMA”
- [22] Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Favre, C., & Yamamoto, S., “Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293-2422 Source A Studied with ALMA”
- [23] Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., “Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335”
- 【IAU Symposium 332 Astrochemistry VII, Puerto Varas, 2017年3月20日-24日】
- [24] Oya, Y., “Chemical Change in the Disk Forming Region of IRAS 16293-2422 Studied with ALMA”, T8 (口頭)
- [25] Ebisawa, Y., Watanabe, Y., Sakai, N., Menten, K., & Yamamoto, S., “OH 18 cm Transition as a Thermometer of Molecular Cloud”, P27
- [26] 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., “Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335”, P44
- [27] Watanabe, Y., Nishimura, Y., Sakai, N., Sorai, K., Harada, N., & Yamamoto, S., “Molecular-Cloud-Scale Chemical Compositions in W51”, P101
- [28] Yoshida, K., Sakai, N., Watanabe, Y., López-Sepulcre, A., Lefloch, B., Takano, S., & Yamamoto, S., “The molecular isotopic ratios in the low-mass protostar L1527”, P105
- 招待講演
- [29] Yamamoto, S., “Chemical Tracers of Dynamics in Low-Mass Protostellar Objects”, IAU Symposium 332 Astrochemistry VII, Puerto Varas, 2017年3月20日-24日
- (国内会議)
- 一般講演
- 【天文学会 2016年秋季年会、愛媛大学、2016年9月14-16日】
- [30] 海老澤勇治、前澤裕之、坂井南美、Karl Menten、山本智、「OH 18 cm 線の吸収線で探る HCL2 領域における構造形成 (2)」<sub>J</sub>, P103a
- [31] 渡邊祥正、坂井南美、酒井剛、廣田朋也、山本智、「NGC 2264 CMM3 における ALMA を用いた高空間分解能観測」<sub>J</sub>, P111a
- [32] 今井宗明、坂井南美、Ana López-Sepulcre、大屋瑠子、渡邊祥正、山本智、「ALMA による低質量原始星天体 B335 の化学組成の研究 2」<sub>J</sub>, P117a
- [33] 吉田健人、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「星形成領域 L1527 における H<sub>2</sub>CO の重水素化物の観測」<sub>J</sub>, P118a
- [34] 大屋瑠子、渡邊祥正、山本智、坂井南美、Ana López-Sepulcre、Cecilia Ceccarelli、Bertrand Lefloch、「Class 0 原始星コア L483 の円盤形成領域における複雑な有機分子の検出」<sub>J</sub>, P119a
- [35] 大屋瑠子、大西崇介、森脇可奈、渡邊祥正、山本智、坂井南美、「Class 0 原始星天体 IRAS 16293-2422 Source B の回転構造の解析」<sub>J</sub>, P120c
- 【天文学会 2017年春季年会、九州大学、2017年3月15-18日】
- [36] 西村優里、渡邊祥正、原田ななせ、下西隆、坂井南美、相川祐理、河村晶子、山本智、「W3(OH) 領域の巨大分子雲スケールの化学組成」<sub>J</sub>, Q02a
- [37] 千葉雄太郎、坂井南美、海老澤勇治、吉田健人、酒井剛、渡邊祥正、山本智、「テラヘルツ帯実験室分子分光計の開発」<sub>J</sub>, V109b
- 招待講演
- [38] 大屋瑠子、「IRAS 16293-2422A のエンベロープ/ディスクシステム」<sub>J</sub>, 新学術領域「宇宙分子進化」全体集会、北海道大学、2016年7月11日-12日
- [39] 渡邊祥正、西村優里、山本智、「Chemical Composition and Chemical Age of Giant Molecular Cloud」<sub>J</sub>, 近傍銀河の分子ガスの大規模撮像観測が拓く星間物質と星生成の研究に関する新展開、国立天文台、2016年11月17日-18日

## 1 Yamamoto Group

**Research Subjects:** Submillimeter-wave and Terahertz Astronomy, Star and Planet Formation, Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Development of Terahertz Detectors

**Member:** Satoshi Yamamoto and Yoshimasa Watanabe

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 a astrochemical viewpoint.

Since the temperature of a molecular cloud is as low as 10 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. In particular, there exist a number of atomic and molecular lines in the millimeter to terahertz region, and we are observing them with various large radio telescopes including ALMA.

We are conducting a line survey of low-mass star forming regions with Nobeyama 45 m telescope and ASTE 10 m telescope, aiming at detailed understanding of chemical evolution from protostellar disks to protoplanetary disks. In the course of this effort, we have recently established a new chemistry occurring in the vicinity of a newly born star, which is called Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC). In WCCC, carbon-chain molecules are produced by gas phase reactions of  $\text{CH}_4$  which is evaporated from ice mantles. This has recently been confirmed by our detection of  $\text{CH}_3\text{D}$  in one of the WCCC sources, L1527. Existence of WCCC clearly indicates a chemical diversity of low-mass star forming regions, which would probably reflect a variety of star formation. We are now studying how such chemical diversity is brought into protoplanetary disks by using ALMA. In L1527, we have found that carbon-chain molecules only exist in an infalling-rotating envelope outside the centrifugal barrier ( $r = 100$  AU), while SO preferentially exists around the centrifugal barrier. Hence, chemical compositions drastically changes across the centrifugal barrier of the infalling gas. Further analyses 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. Our NbTiN mixer shows the noise temperature of 470 K at 1.5 THz, which corresponds 7 times the quantum noise. This is the best performance at 1.5 THz in spite of the use of the wave-guide mount. Furthermore, we successfully realized the waveguide-type NbN HEB mixer by using the NbN/AlN film deposited on the quartz wafer. The 0.8/1.5 THz dual-band HEB mixer receiver was assembled, and was installed on the ASTE 10 m telescope for astronomical observations. The commissioning runs were performed in 2011, 2012, and 2015. We successfully observed Moon and Jupiter in the 0.9 THz continuum emission, and the Orion A molecular cloud in the  $^{13}\text{CO}$   $J = 8 - 7$  line emission.

[1] Shiino, T., Shiba, S., Sakai, N., Yamakura, T., Jiang, L., Uzawa, Y., Maezawa, H., and Yamamoto, S., Improvement of the Critical Temperature of Superconducting NbTiN and NbN Thin Films Using the AlN Buffer Layer, *Supercond. Sci. Technol.* **23**, 045004 (2010).

[2] Watanabe, Y., Sakai, N., Lindberg, J.E., Jorgensen, J.K., Bisschop, S.E., and Yamamoto, S., “ An Unbiased Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE ”, *ApJ*, **745**, 126 (2012).

[3] Sakai, N. and Yamamoto, S., “ Warm Carbon-Chain Chemistry ”, *Chemical Reviews*, **113**, 8981 (2014).

[4] Sakai, N. et al., “ Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar ”, *Nature*, **507**, 78, 2014.