

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。本年度、10月に大屋瑤子助教が着任し、研究教育体制が強化された。

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) 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ている。

【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。

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、おおみそ座の 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

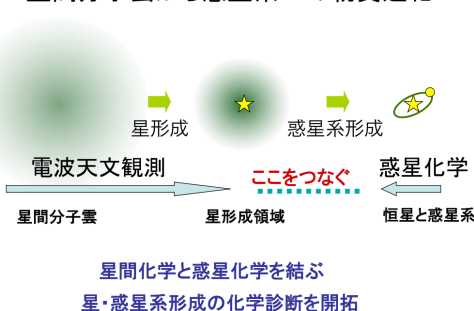


図 2.1.1: A schematic illustration of our goal

【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 データの解析の結果、Source B において、原始星周囲での分布が分子種によって異なることがわかった。この原始星円盤形成領域における化学組成の劇的な変化は、以前に報告した Source A での傾向と一致する。この天体は速度構造の解析が困難な face-on の向きを持つ (円盤が視線方向を向いている) が、物理構造の変化に伴う化学組成の変化を利用することで、そのエンベロップガスから円盤にかけての物理構造を明らかにした。

【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。ALMA データの解析の結果、この原始星から噴き出すアウトフローの構造が、CCH と CS の分子輝線によって捉えられた。アウトフローは東西に長さ 2000 au 程度に広がっており、その速度構造は、放物面モデルで概ねよく再現されることがわかった。これにより、このアウトフローは天球面とほぼ平行に噴き、天球面との成す角は $(0-15)^\circ$ と求められた。さらに、観測された速度構造からは、アウトフローのキャビティー壁における回転運動が示唆された。

【中・低質量星形成領域における硫黄を含む分子】

12 個の若い中・低質量天体に対して、硫黄原子 (S) を含む分子輝線のサーベイ観測を行った。観測には野辺山 45 m 望遠鏡と、IRAM 30 m 望遠鏡を使用した。その結果、CS, SO, H_2CS , OCS などの様々な硫黄関連分子の輝線が検出された。SO や H_2CS の強度は $C^{34}S$ の強度とほとんど比例関係にあるのに対し、OCS はいくつかの天体でのみ強く検出されることがわかった (図 2.1.2)。さらに、へび座にある Class 0 原始星 SMM1 や、ペルセウス座にある Class 0 原始星 IRAS 4A など、飽和有機分子に富むホットコリノ天体において、OCS の輝線強度が強い傾向が見出された。

【孤立した星形成領域 B335 の高分解能観測】

B335 は、孤立した低質量星形成領域として知られ、星形成のモデルケースとして活発な研究が行われている。本研究では、この天体に対して ALMA による高分解能観測 ($0.1''$) を行った。その結果、B335 で初めて明瞭な回転運動を検出した。この回転は、ケプラー運動のモデルでは説明することが難しく、回転しながら落下するエンベロップガスのモデルでうまく説明できる。この回転運動から B335 の原始星の質量が 0.05 太陽質量程度であることがわかった。本研究により、B335 ではエンベロップガスの比角運動量が小さく、円盤形成領域が非常に小さいことが明らかになった。

【IRAS 15398–3359】

IRAS 15398–3359 は、炭素鎖分子に恵まれる Warm Carbon-Chain Chemistry 天体で、Class 0 の低質量原始星として知られる。本研究では、この原始星周りの円盤形成について、ALMA による高分解能観測 ($\sim 0.1''$) を行った。その結果、SO 分子輝線では原始

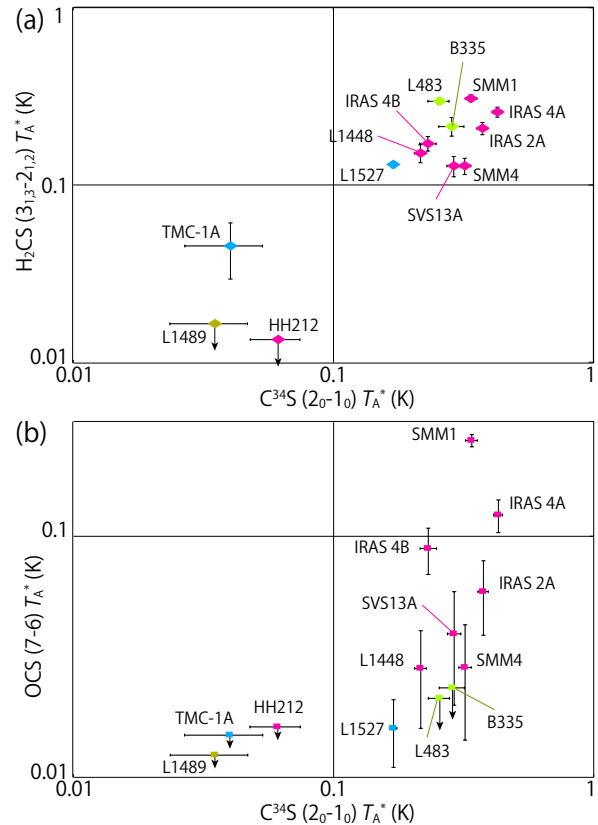


図 2.1.2: Plots of the H_2CS (a) and OCS (b) intensities against the $C^{34}S$ intensity. H_2CS shows a good correlation with $C^{34}S$, while OCS seems to be enhanced in hot corino sources (red).

星付近に集中した高速度成分が検出された。このことは原始星周りにすでに円盤構造が形成されていることを示唆する。ケプラー回転をしていることを仮定して原始星質量を見積ると、 $0.007 M_\odot$ となった。このように小さな原始星質量にもかかわらず、すでに円盤構造を持っている天体は、これが初めてであり、原始星周りでの円盤形成過程の理解において重要な意義がある。

【L328–IRS】

L328–IRS は Class 0 の低質量原始星である。この天体は光度が比較的小さく ($\sim 0.05 L_\odot$)、Very Low Luminosity Object (VeLLO) と呼ばれる天体の 1 つである。この天体に対する ALMA のアーカイブデータ (分解能: $\sim 0.1''$) を解析した。その結果、 $C^{18}O$ 分子輝線の速度構造から、原始星周りに回転運動を検出した。これは回転している円盤構造が形成されている可能性を示唆する。円盤がケプラー回転していることを仮定すると、原始星質量は $0.2 M_\odot$ と見積もられた。この天体は光度が非常に小さいにもかかわらず、原始星質量は IRAS 15398–3359 より大

きく、より成長しているとみられる。

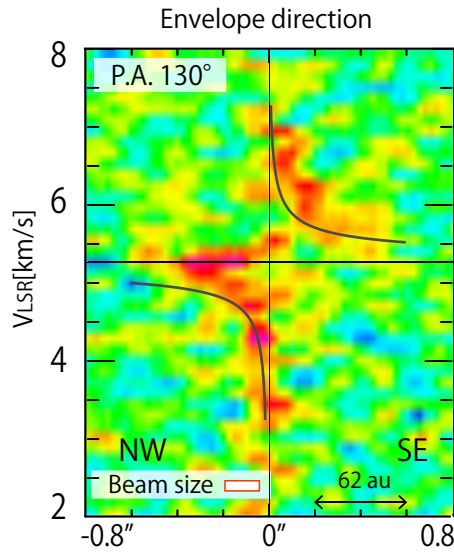


図 2.1.3: The PV diagram of the SO (6_7-5_6) emission along the envelope direction centered at the continuum peak position. The dashed curves show the model of Keplerian rotation.

【ペルセウス座分子雲における DNC/HNC 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、重水素濃縮度は星なしコアの時代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 bolometric temperature に対し強い負の相関をもつことがわかった。また、分子イオン N_2H^+ の原始星進化に対する相関と比較すると中性分子 HNC の重水素濃縮度では原始星進化に対して緩やかに減少していることが確認された。これは、中性分子は分子イオンよりも反応性が低く、原始星誕生後も影響を受けにくいとみられる。

【原始星 L1527 における H_2CO および $c-C_3H_2$ の D/H 比】

低質量原始星 L1527 に対して H_2CO および $c-C_3H_2$ とその重水素化物を ALMA の ACA アレイを用いて観測した。その結果、ノーマル種は原始星中心にピークを持つのにに対し、重水素化物は原始星から 1000 au 程度離れた位置にピークを持つことがわかった。重水素化物のピークでは $c-C_3HD/c-C_3H_2$ 比が 6% 程度だが、 HD/CO 比は 90% 程度と非常に高い値を示した。 $c-C_3H_2$ は気相中で生成されるが、 H_2CO は気相中でも星間塵上でも生成されるため、D/H 比が 2 つの分子で異なる理由として、 H_2CO では星間塵上で重水素濃縮が効率よく進んでいる可能性が考えられる。

【L1527 のラインサーベイ】

おうし座の L1527 は WCCC の性質を示す代表的な

低質量原始星である。我々はその化学組成の全貌を明らかにするため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行ってきた。80–116 GHz の周波数範囲の観測で 243 本の輝線が検出され、69 種類の分子が同定された。典型的なホットコリノ天体 IRAS 16293–2422 の観測と比較すると、炭素鎖分子の存在量が 10 倍程度も高かった一方で、 $HCOOCH_3$ などの大型飽和有機分子の存在量は 10^{-3} – 10^{-2} 程度以下であることがわかり、WCCC 天体とホットコリノ天体の化学的多様性が改めて確認された。

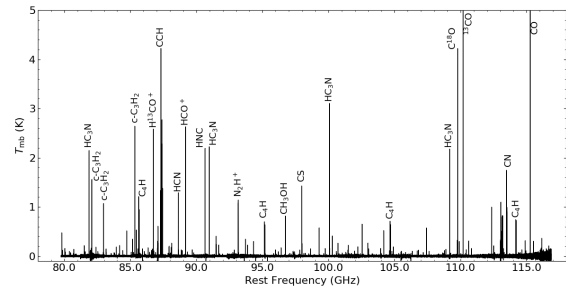


図 2.1.4: Spectral line survey in the 3 mm band toward L1527

【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。おうし座の 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 ($> 10^{15}$) 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と示唆される。

【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 100 K 以上であることを示しており、フィラメント衝突の可能性を示唆している。

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が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）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。

【0.9 THz HEB ミキサにおける AlN バッファ層の効果】

我々は、石英基板上に NbTiN 薄膜を製膜する際、AlN をバッファ層に用いることで NbTiN 薄膜の超伝導特性が著しく改善されることを見出した。しかし、それを用いて作成した HEB ミキサの雑音性能は改善せず、雑音性能に対する AlN バッファ層の効果は依然不明であった。今回、このことを、0.9 THz 帯 HEB ミキサ素子製作でバッファ層を用いた場合と用いない場合をできるだけ同条件で行うことによって検証した。その結果、AlN バッファ層を導入すると素子の超伝導転移温度が大きく上昇するとともに、雑音性能も向上することが示された。その原因が、格子冷却効率が上がったためなのか、それとも超伝導転移温度の上昇だけが反映されているのかを確かめる実験が進行中である。

【1.9 THz HEB ミキサの開発】

地球・惑星大気環境やプラズマ診断、実験室分光などのテラヘルツ分光計測を見据え、ホーン/導波路型の 1.9THz 超伝導 NbTiN-HEB ミキサ素子の開発を行った。素子は設計通りの良好な超伝導 IV 特性を示し、最終的に導波路への実装のために水晶基板を厚み 18 μm 、幅 36 μm にチップ化を行う。その際の微細加工が課題となっていたが、本年、ダイシングブレードのポストプロセス、接着剤の硬度、研磨時の平行性のキャリブレーションの手法などを改善することで、微細加工の歩留りをほぼ 100% に改善することができた。本研究は大阪府立大学の前澤裕准教授との共同研究である。

【サブミリ波帯実験室分子分光計の開発】

サブミリ波帯観測用の超伝導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を理化学研究所で開発した。これは、長さ 2 m 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。試料気体分子からの放射を直接受信するため、従来のサブミリ波帯の分光実験に比べてはるかに広い周波数帯域を同時に測定できること

が、この方式の特長である。本年度はこの装置を立ち上げ、HDO, D₂O, CH₃OH を試料に用いてテスト測定を行った。その結果、200 GHz 帯においてこれらの分子の回転スペクトル線を測定することに成功した。この実験で得られたスペクトル線の静止周波数の一部には文献値からのずれが見られたため、正確な周波数標準を用いて検証を行う予定である。また、今回用いた超伝導受信機には改良の余地があるため、将来的には感度を向上させることによりさらに短時間での測定を可能にできる見込みである。さらに、より周波数の高いテラヘルツ帯における分光測定を実現させるため、本研究室で開発している 0.9 THz 帯用受信機を搭載して実験を行うことも計画している。

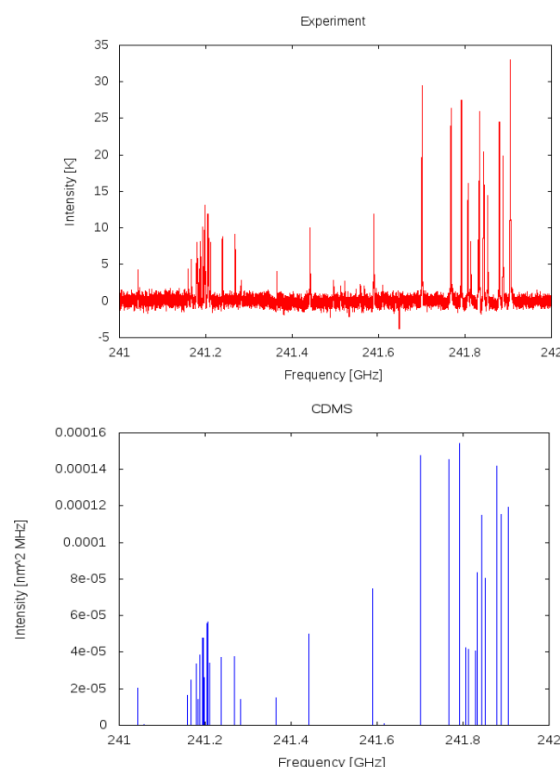


図 2.1.5: Laboratory spectrum of CH₃OH in comparison with calculated one

<受賞>

- [1] 大屋瑠子、「若い太陽型原始星天体の物理的・化学的構造の解明」、東京大学総長賞
- [2] 大屋瑠子、「若い太陽型原始星天体の物理的・化学的構造の解明」、東京大学理学系研究科奨励賞

<報文>

(原著論文)

- [3] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., “Complex Organic Molecules in Taurus Molecular Cloud-1”, *ApJ*, 854, 116 (11pp) (2018).
- [4] Oya Y., Moriwaki, K., Onishi, S., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Favre, C., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., & Yamamoto, S., “Chemical and Physical Picture of IRAS 16293–2422 Source B at a Sub-arcsecond Scale Studied with ALMA”, *ApJ*, 854, 96 (19pp) (2018).
- [5] Nishimura, Y., Watanabe, Y., Harada, N., Sakai, N., Shimonishi, T., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., “Molecular-cloud-scale Chemical Composition II. A Mapping Spectral Line Survey toward W3(OH) in the 3 mm Band”, *ApJ*, 848, 17 (18pp) (2017).
- [6] Watanabe, Y., Sakai, N., Lopez-Sepulcre, A., Sakai, T., Hirota, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., & Yamamoto, S., “Discovery of Striking Difference of Molecular-emission-line Richness in the Potential Proto-binary System NGC 2264 CMM3”, *ApJ*, 847, 108 (8pp) (2017).
- [7] Watanabe, Y., Nishimura, Y., Harada, N., Sakai, N., Shimonishi, T., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., “Molecular-cloud-scale Chemical Composition I. A Mapping Spectral Line Survey toward W51 in the 3 mm Band”, *ApJ*, 845, 116 (30pp) (2017).

(学位論文)

- [8] 大屋瑠子, “A Few Tens au Scale Physical and Chemical Structures around Young Low-Mass Protostars” (博士論文)
- [9] 千葉雄太郎, 「超伝導ミクサを用いた分子分光実験装置の開発」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Chiba, Y., Sakai, N., Ebisawa, Y., Yoshida, K., Sakai, T., Watanabe, Y & Yamamoto, S., “A New Terahertz Emission Spectrometer at RIKEN”, 34th International Symposium on Free Radicals, Hayama, Japan, 2017年8月27-9月1日
- [11] Chiba, Y., Sakai, N., Ebisawa, Y., Yoshida, K., Sakai, T., Watanabe, Y & Yamamoto, S., “A New Emission Spectrometer at RIKEN”, Laboratory Astrophysics Workshop 2017, Bonn, Germany, 2017年11月29-12月1日

招待講演

- [12] Oya, Y., “L483: Warm carbon-chain chemistry source harboring Hot Corino activity”, Symposium “Evolution of Molecules in Space”, 北海道大学, 2017年6月27日–29日

(国内会議)

一般講演

- [13] 大屋瑠子, 「数10 auスケールで見た Class 0-I 低質量原始星天体の物理的・化学的構造」, 基研研究会「原始惑星系円盤」, 京都大学, 2017年7月10日–12日
【天文学会2017年秋季年会, 北海道大学, 2017年9月11日–13日】
- [14] 大屋瑠子, 山本智, 坂井南美, 渡邊祥正, 廣田朋也, 「Class 0 低質量原始星コア L483 に付随するアウトフローの回転構造の解析」, P108a
- [15] 海老澤勇治, 坂井南美, Karl Menten, 山本智, 「HCL2 領域の直線構造における OH 18 cm 線の吸収線の解析」, P135a
- [16] 吉田健人, 坂井南美, 渡邊祥正, 山本智, 「星形成領域における H₂CO の ¹³C 同位体比の観測」, P137a
- [17] 今井宗明, 坂井南美, Ana López-Sepulcre, 大屋瑠子, 渡邊祥正, 山本智, 「孤立した星形成領域での炭素鎖分子形成」, P136a
- [18] 大小田結貴, 大屋瑠子, 山本智, 坂井南美, 渡邊祥正, 「Class 0 低質量原始星 IRAS 15398-3359 の円盤・エンベロープ構造」, P105a
【天文学会2018年春季年会, 千葉大学, 2018年3月14日–17日】
- [19] 大屋瑠子, 山本智, 坂井南美, 渡邊祥正, 「低質量原始星形成領域における硫黄関連分子のサーベイ観測」, P111a
- [20] 海老澤勇治, 坂井南美, Karl M. Menten, 山本智, 「OH 18 cm 線で探る Pipe nebula の構造形成」, Q41c
- [21] 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 H₂CO の重水素化物の ALMA 観測」, P112a
- [22] 今井宗明, 坂井南美, Ana López-Sepulcre, 大屋瑠子, 渡邊祥正, 山本智, 「ペルセウス座分子雲での重水素濃縮度のサーベイ」, P113a
- [23] 大小田結貴, 大屋瑠子, 山本智, 坂井南美, 渡邊祥正, 「Class 0 低質量原始星 IRAS 15398-3359 の円盤形成領域における化学的構造」, P114a
- [24] 竹ヶ原諒貴, 海老澤勇治, 大口脩, 山本智, 坂井南美, 「0.9 THz 帯超伝導 HEB ミクサにおける AlN バッファ層の影響の評価」, V125b

招待講演

- [25] 大屋瑠子, 「Class 0-I 低質量原始星天体の円盤形成領域における化学的多様性とその変化」, 宇宙生命計算科学連携拠点第3回ワークショップ, 筑波大学, 2017年11月20日–21日
- [26] 山本 智, 「星間雲の階層構造と化学」, 2017年度「物質階層の原理を探る統合的実験研究」研究報告会, 理研, 2018年2月13日–14日

II

Summary of group activities in 2017

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 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 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 understandings 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 CH_4 which is evaporated from ice mantles. The discovery of WCCC clearly indicates a chemical diversity of low-mass star forming regions, because only hot corino chemistry, which are rich in unsaturated carbon-chain molecules and deficient in carbon-chain molecules, have so far been recognized. The chemical diversity would reflect the star formation history of each source.

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 the 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. Further studies with ALMA 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. 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. We successfully observed the Orion A molecular cloud in the $^{13}\text{CO } J = 8 - 7$ line emission. This receiver is now used for laboratory spectroscopy of interstellar molecules at RIKEN.

- [1] Sakai, N. and Yamamoto, S., Warm Carbon-Chain Chemistry, *Chemical Reviews*, **113**, 8981 (2014).
- [2] Sakai, N. et al., Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar, *Nature*, **507**, 78, (2014).
- [3] 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).