

I

# 研究室別 2015年度 研究活動報告



## 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) 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進させつつある。

### 【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、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、2011 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。

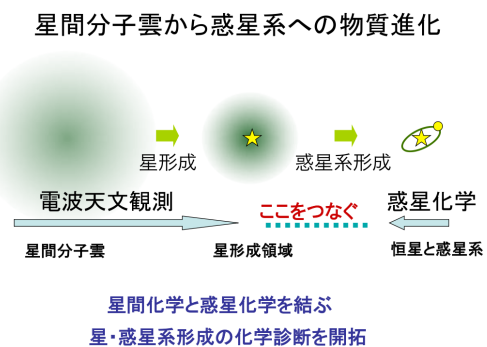


図 0.1.1: A schematic illustration of our goal

### 【TMC-1A における遠心力バリアの同定】

TMC-1A はおうし座にある進化の進んだ (Class I) WCCC 天体である。この天体における分子分布を ALMA を用いて 0.5" の分解能で調べた。CS は主に回転落下エンベロープに存在し、SO はその遠心力

バリア近傍に存在することが確かめられた。これは、Class 0/I 段階にある WCCC 天体 L1527 における特徴と非常に類似している。SO は遠心力バリア近傍で星間塵から蒸発してきたものと見られる。回転落下エンベロープの速度構造の解析から、遠心力バリアの半径が 50 AU、中心星の質量が 0.2-0.3 太陽質量であることがわかった。一方で、進化が進んだ結果として回転落下する分子ガスの非対称分布が顕著に見られた。本研究により、Class I 天体においても遠心力バリアが力学構造に重要な影響を与えており、また、その近傍で劇的な分子組成の変化が起こっていることが示された。

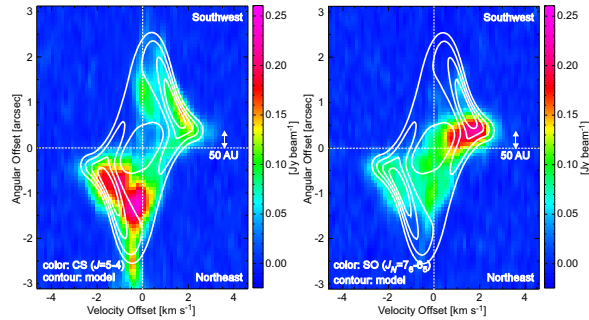


図 0.1.2: Position-velocity diagrams of CS and SO observed toward TMC-1A. Contours are intensities expected by the infalling-rotating envelope model. SO exists around the centrifugal barrier, while CS reside in the envelope.

#### 【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 (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。また分子種によって捉えられる成分が異なり、エンベロープ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 0.1.3)。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。 $\text{H}_2\text{CS}$  の観測から、この位置でガスの温度が高くなっていることが示され、力学構造と分子組成の関連性が示唆される。

#### 【低質量原始星 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、

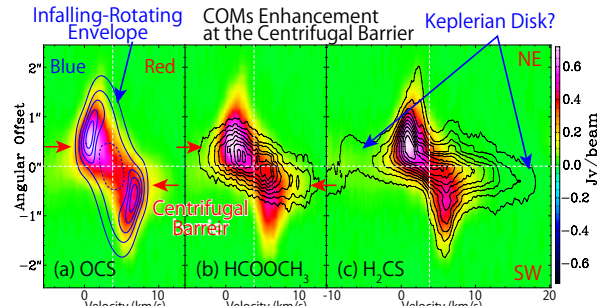


図 0.1.3: PV diagrams of OCS ( $J=19-18$ ; color),  $\text{HCOOCH}_3$  ( $19_{9,10}-19_{8,11}$  E; contours in panel b),  $\text{H}_2\text{CS}$  ( $7_{0,7}-6_{0,6}$ ; contours in panel c) along the line along which the disk/envelope system is extended. Blue contours in panel (a) represent the result of an infalling-rotating envelope model.

$\text{HCOOCH}_3$  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。

#### 【低質量原始星 B335】

B335 は低質量 Class 0 天体であり、また、Bok Globule に存在する孤立した星形成領域としても知られる。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、B335 が hot corino 天体であることを初めて示した。大型飽和有機分子は原始星近傍の 10 AU 程度のコンパクトな領域に存在することが速度幅の解析から明らかになった。この天体ではエンベロープの回転運動は明瞭ではなく、原始星近傍まで落下運動を続けていると見られる。今後各分子を詳細に解析することで、原始星天体の力学構造の理解につながると考えられる。

#### 【原始星 L1527 における CCH および CCD】

おうし座分子雲にある原始星 L1527 に対して CCH および CCD 分子を ALMA を用いて観測した。その結果、CCH が多く存在する原始星近傍のエンベロープと外側とで CCD/CCH 比を比べると、原始星近傍で D/H 比が低いことがわかった。L1527 は WCCC 天体であり、原始星近傍ではダストから蒸発した  $\text{CH}_4$  が CCH 分子を作ると考えられている。従って、 $\text{CH}_4$  の D/H 比が CCD/CCH 比に反映されていると考えられ、一方外側では星なしコア時代の CCD/CCH 比が残っていると考えられる。このように D/H 比から、原始星コア内部における分子形成の起源を多読することができることを示した。

#### 【星形成領域での $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子の $^{13}\text{C}$ 同位体比異常】

IRAM 30 m 望遠鏡を用いた進化段階の異なる 11 の星形成領域に対する 1-3 mm 帯のラインサーベイ観測 (ASAI プロジェクト) のデータを用いて、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$  分子とその  $^{13}\text{C}$  同位体種の観測を行った。その結果、星なしコア TMC-1 および 2 つの原始星 B1, IRAS4A において、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$  分子とその  $^{13}\text{C}$  同位体の  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比が元素の同位体比 (60-70) より高く、さらに 2 種類の  $^{13}\text{C}$  同位体の存在量が異なることを明らかにした。これらの異常は低質量原始星 L1527 で確認されていたが、今回の結果からそれらが天体によらず見られることがわかった。

【NGC 2264 の ALMA によるラインサーベイ】  
非常に若い進化段階の大質量原始星 NGC 2264 に対して、336 – 359 GHz 帯のラインサーベイ観測を ALMA を用いて行なった。原始星近傍のスペクトルは高励起の分子輝線が卓越しており、ASTE 望遠鏡による同一周波数帯のラインサーベイ観測の結果と大きく異なっていた。特に、ASTE で検出されていた高励起の  $\text{CH}_3\text{OH}$  輝線は、原始星にも付随しており、ホットコアを形成していることがわかった。さらに、連続波の観測から、この原始星が連星系であることが示された。

【ペルセウス座分子雲における D 化物分子サーベイ】  
hot corino 天体と WCCC 天体に代表される低質量原始星天体の化学的多様性を生み出す原因として、星間ガスが収縮して原始星が誕生するまでの「星なしコア」時代の時間の長短が考えられている。そこで、同様に「星なしコア」時代の時間を反映すると考えられる重水素濃度を 37 の低質量原始星天体で統計的に比較した。その結果、重水素濃度と天体の化学組成の間には相関が示唆され、上記の仮説を支持する。さらに、原始星天体の化学組成はそれが分子雲内のどの位置にあるかに依存している傾向が見られ、「星なしコア」の長短が周囲の星形成などの環境効果を反映している可能性がある。

【TMC-1 における大型有機分子の検出】  
飽和有機分子の生成メカニズムについて理解を深めるため、星なしコア TMC-1 の観測研究を行っている。観測により、 $\text{CH}_3\text{CHO}$  が星間塵上で生成される  $\text{CH}_3\text{OH}$  とよく似た輝線プロファイルを示し、 $\text{CH}_3\text{OH}$  と同様に星間塵上で生成されることを示唆する結果を得た。一方、 $\text{H}_2\text{CCO}$ 、 $c\text{-C}_3\text{H}_2\text{O}$  は気相反応で生成される炭素鎖分子や  $\text{CS}$  とよく似たプロファイルを示し、気相反応による生成が示唆された。また、 $\text{H}_2\text{CO}$  はその中間的なプロファイルであり、気相と星間塵上の両方の反応の寄与が考えられる。また、TMC-1 近傍の  $\text{CH}_3\text{OH}$  ピーク位置で、 $\text{CH}_3\text{CHO}$ 、 $\text{HCOOCH}_3$ 、 $(\text{CH}_3)_2\text{O}$  のスペクトルを検出した。これらの結果は、星形成の初期の段階から複雑な有機分子は生成されており、その生成メカニズムの理解には気相と星間塵上の両方の反応を精査する必要があることを示す。

【おおかみ座領域における OH 18 cm 線観測】  
おおかみ座分子雲の Lupus-1 は特徴的な直線構造を形成している。これに垂直なストリップに対して 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) からなり、最近の我々の研究から、この 4 本の強度からガスの運動温度が決定できることが示されている。観測の結果、Lupus-1 では、直線構造に垂直な方向 (南西から北東) に温度勾配および速度勾配が見られ、北東で線幅が大きくなることがわかった。以上の結果は、Lupus-1 が北東にある OB アソシエーションと相互作用をもつ可能性を示唆している。

【OH 18 cm 線の強度異常 (1702 MHz 吸収線)】  
おうし座分子雲の HCL2 領域は北東部に特徴的な直線構造をもつ。この直線構造に対して OH 18 cm 線の観測を行ったところ、1720 MHz 線の吸収線が検出された。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、ダストの遠赤外線放射の効果を考慮することで、柱密度が大きい ( $> 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) 場合にある程度再現することができた。即ち、1720 MHz の吸収線は直線構造の密度の高い構造を反映していると考えられ、直線構造の起源、即ち、分子雲形成過程に関連している可能性がある。

## 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 のバーと渦状腕の化学組成】  
近傍の棒渦巻銀河 M83 の渦状腕とバー領域に対して、ALMA を用いて巨大分子雲のサイズに相当する  $\sim 30$  pc の空間分解能で観測を行ない、それぞれの領域で 8 種の分子の分布を明らかにした (図 0.1.4)。 $\text{CH}_3\text{OH}$  の組成は、渦状腕よりもバー領域で高い傾向が見られた。その理由としてバー領域で発生した衝撃波によりダスト上の  $\text{CH}_3\text{OH}$  が蒸発したことが考えられる。これは分子雲の化学組成が大局的なガスの運動を反映することを示唆する重要な結果である。

【NGC 3627 における化学組成】  
近傍銀河 NGC 3627 の渦状腕とバーエンド領域に対して、IRAM 30 m 望遠鏡を用いて波長 3mm 帯のラインサーベイ観測を実施した。1 kpc スケールでの

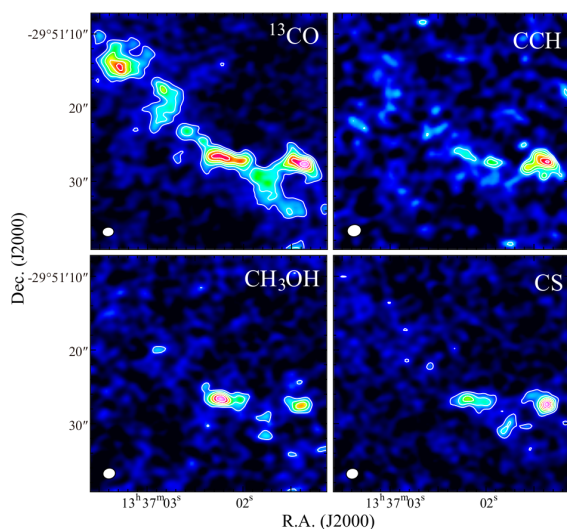


図 0.1.4: Distributions of  $^{13}\text{CO}$ , CCH,  $\text{CH}_3\text{OH}$ , and CS observed toward the bar region in M83 with ALMA.

化学組成には領域ごとの違いが見られないが、星形成が活発なバーエンドの速度成分では化学組成にわずかな違いが見られた。その原因を明らかにするために、ALMA を用いて 60 pc スケールの空間分解能でのマッピング観測を行なっている。現在、 $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$ 、CS の観測は完了しており、詳細な解析が進行中である。

#### 【IC10 におけるラインサーベイ】

重元素量の低い環境にある分子雲では、太陽系近傍とは質的に異なる化学組成が見られると考えられる。低重元素量の銀河である IC10 の化学組成を調べるため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて波長 3 mm 帯のラインサーベイ観測した。得られたスペクトル線パターンは同様に重元素量の低い大マゼラン雲の星間分子雲でのスペクトル線パターンと類似しており (図 0.1.5)、CCH 分子が豊富で  $\text{CH}_3\text{OH}$  が少ないという特徴が見られた。これらの特徴は、いずれも星間塵の存在量が少ないため光解離領域が分子雲内部まで広がることに起因していると思われる。このことから、これらの化学的特徴は低重元素量銀河に共通する性質であると考えられる。

#### 【NGC6822 におけるラインサーベイ】

IC10 や大マゼラン雲で見られた化学組成の特徴が低重元素量の銀河で一般的なものをさらに検証するため、低重元素量の銀河 NGC6822 に対して、IRAM 30 m 望遠鏡を用いて波長 3 mm と 2 mm 帯のラインサーベイ観測を行った。その結果、NGC6822 の化学組成も IC10 の化学組成と同様の特徴を示すことがわかった。この観測により、低重元素量銀河に共通の化学的特徴がはっきりと同定され、今後、遠方銀河を含む低重元素量銀河における化学組成研究の重要な指

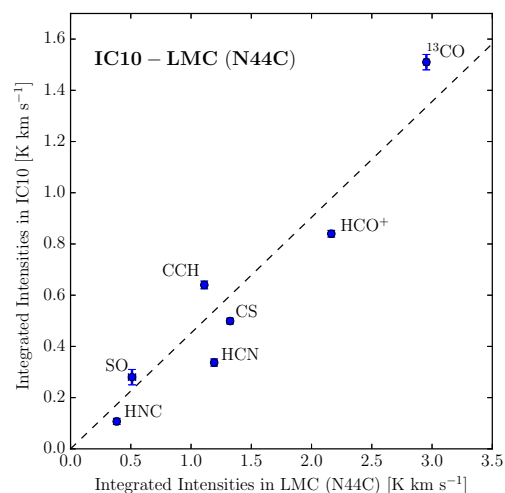


図 0.1.5: Correlation plot of integrated intensities between IC 10 and N44C (LMC).

針となるを考える。

#### 【低重元素量の矮小銀河における CO サーベイ】

上述のように、低重元素量環境に特徴的な化学組成が明らかになりつつある。新たな観測対象を開拓するため、ASTE 10 m 望遠鏡を用い、9 個の近傍低重元素量銀河で  $\text{CO}(J=3-2)$  輝線を観測した。結果として、6 つの銀河で輝線の検出に成功した。これらは今後、高感度の観測で化学組成を調べるための良い対象として期待できる。

#### 【巨大分子雲 W51 のマッピングラインサーベイ】

銀河系内の巨大分子雲 W51 を Mopra 22m 望遠鏡で広域マッピング観測 (40 pc $\times$ 50 pc) を行なった。分子雲全体で平均したスペクトルは、Hot Core でのスペクトルとは大きく異なり、M51 などの系外銀河の渦状腕で観測されるスペクトルと酷似していることがわかった。これによりは、系外銀河で観測されるスペクトルは、空間的に広がった分子ガス成分が主要な寄与をしていることが示された。

### 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 ミクサ素子の開発研究を進めている。

#### 【ASTE への THz 受信機搭載実験】

2015 年 9 月下旬から 10 月下旬の約 1ヶ月間、チリ・アタカマ砂漠（標高 5000 m）の ASTE 10 m 望遠鏡に、0.9THz と 1.5 THz を観測する HEB ミクサを利用した受信機の搭載実験を行った。前回の搭載では、基準周波数信号（LO）をジュワー側面から準光学的に入射していたため、光学系調整の難しさとジュワーの振動による LO 強度の不安定性が問題であった。そこで今回、LO の最終通倍器をカートリッジ内に設置した新たな受信機を開発した。搭載した受信機は良好に動作し、降水量が 0.5 mm での 0.9 THz における大気込みの受信機雑音は約 3200 K であった。降水量が 1 mm 以下の条件で観測できたのは 7 日間のみであった。0.9 THz については、連続波による月と木星の観測と Orion KL の  $^{13}\text{CO}(J=8-7)$  の分光観測に成功した。木星の観測から求めた主ビーム能率は 20 % 程度であった。さらに、4 天体の中質量星原始星において  $^{13}\text{CO}(J=8-7)$  を検出した。1.5 THz については大気の状態が悪く、R-Sky の測定で受信機の性能を確認できなかった。



図 0.1.6: THz experiment at ASTE

#### 【ASTE 望遠鏡を用いた $^{13}\text{CO}(J=8-7)$ 輝線観測】

本研究室で開発した THz 受信機を用いて、低質量原始星領域 (RCrA IRS7B, NGC1333 IRAS2A, OMC2 FIR4) の  $^{13}\text{CO}(J=8-7, 881\text{ GHz})$  の輝線観測を行った。RCrA IRS7B における  $^{13}\text{CO}(J=8-7)$  輝線は、その速度構造から RCrA からの紫外線によって影響を受けている温かい領域をトレースしており、その分布を探るよいプローブとなることわかった。また、NGC1333IRAS2A においては、原始星近傍の密度の高い領域から放射されているようであることが観測から示唆された。 $^{13}\text{CO}(J=8-7)$  輝線が原始星周辺の高温度ガスのよいトレーサとなることを示し、 $^{13}\text{CO}$  の高励起線観測の意味を示すことができた。

#### 【Al 緩衝層を使った HEB ミクサーの評価】

HEB ミクサーの広帯域化を目指して、基板と超伝導薄膜の間に AlN の緩衝層を挟んだ素子を作成し、性能評価を行った。AlN 薄膜は基板と超伝導薄膜のマッチングを改善すると考えられており、これにより超伝導薄膜の厚みを従来の 10.8 nm から 8 nm 程度まで薄くすることができた。薄膜化によって、熱電子の格子冷却の効率が向上するため、HEB ミクサーの広帯域化につながる可能性がある。これまでのところ雑音温度 690 K を確認し、今後は帯域幅の測定を目指している。

#### 【導波路型 1.9THz 帯 HEB ミクサーの開発】

有限要素法による 3 次元高周波電磁界シミュレータと解析モデルを用いて、E/H 面の対称性やサイドロープレベルを改良したダイアゴナルホーンを設計し、これを実装したミクサマウントを切削加工した。マウントはレーザー顕微鏡で計測しながらアセンブリする。また、電子ビーム描画パターンや光露光マスクも製作し、超伝導 NbTiN 細線を集積した HEB ミクサ素子チップの製作を開始した。この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。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., and Yamamoto, S., "Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1", *ApJ*, 802, 74 (2015).
- [2] Yoshida, K., Sakai, N., Tokudome, T., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Takano, S., Lefloch, B., Ceccarelli, C., Bachiller, R., Caux, E., Vastel, C., & Yamamoto, S., "Abundance Anomaly of the  $^{13}\text{C}$  Isotopic Species of  $\text{c-C}_3\text{H}_2$  in the Low-Mass Star Formation Region L1527", *ApJ*, 807, 66 (2015).
- [3] Watanabe, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., Furuya, R., Sakai, T., Hirota, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., and Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward the Young Massive Protostar NGC 2264 CMM3 in the 4 mm, 3 mm, and 0.8 mm Bands", *Astrophys. J.* 809, 162 (2015).
- [4] Oya, Y., Sakai, N., Lefloch, B., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., and Yamamoto, S., "Geometric and Kinematic Structure of the Outflow/Envelope System of L1527 Revealed by Subarcsecond-Resolution Observation of CS", *Astrophysical Journal*, 812, 59 (2015).
- [5] Ebisawa, Y., Inokuma, H., Sakai, N., Menten, K. M., Maezawa, H., & Yamamoto, S., "OH 18 cm Transition as a Thermometer for Molecular Clouds", *ApJ*, 815, 13 (2015).
- [6] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., and Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud", *ApJ*, 818, 161 (2016).

- [7] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Ueda, J., and Yamamoto, S., “Molecular Distribution in the Spiral Arm of M51”, *ApJ*, 819, 144 (2016).
- [8] Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, T., Hirota, T., Aikawa, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., and Yamamoto, S., “Subarcsecond Analysis of the Infalling-Rotating Envelope around the Class I Protostar IRAS 04365+2535”, *ApJ*, 820, L34 (2016).
- (学位論文)
- [9] 相馬達也, “Development of the HEB Receiver for Ground-Base THz Astronomical Observations” (博士論文)
- [10] 吉田健人, 「星形成領域における  $^{13}\text{C}$  および重水素同位体比の研究」(修士論文)
- [11] 海老澤勇治, 「OH 18 cm 線の吸収線で探る分子雲の構造形成」(修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [12] Yoshimasa Watanabe, Yuri Nishimura, Nami Sakai, Kazuo Sorai, Satoshi Yamamoto “Chemical Composition of Molecular Gas from kpc- to 10 pc-scale in Nearby Galaxies” Star Formation Workshop 2015, From Clouds to Cores, NAOJ, 2015 年 6 月 29 日-7 月 1 日.
- [13] Satoshi Yamamoto & Nami Sakai “Carbon-Chain Molecules in Astrophysics” Symposium on Advanced Molecular Spectroscopy, NAOJ, 2015 年 6 月 29 日-7 月 1 日.
- [14] Nami Sakai, Yoko Oya, “Disk and Outflow System in Low-Mass Protostellar Sources” Protoplanetary Disk Dynamics and Planet Formation, JAMSTEC, 2015 年 9 月 29 日-10 月 2 日.
- [15] Yoko Oya, Nami Sakai, Yoshimasa Watanabe, Ana López-Sepulcre, Satoshi Yamamoto, Yuri Aikawa, Tomoya Hirota, Takeshi Sakai, Cecilia Ceccarelli, Bertrand Lefloch, “A drastic change in the disk forming regions”, Workshop on Astrochemistry in Star and Planet Formation, RIKEN, 2016 年 2 月 16 日.
- (国内会議)
- 一般講演
- 【天文学会 2015 年秋季年会、甲南大学、2015 年 9 月 9-11 日】
- [16] 西村優里、下西隆、渡邊祥正、坂井南美、相川祐理、河村晶子、山本智, 「低重元素量の銀河 IC10 にある分子雲の 3 mm 帯ラインサーベイ」, R05a
- [17] 渡邊祥正、西村優里、坂井南美、徂徠和夫、山本智, 「近傍銀河で観測される分子雲スケールの化学組成の意味」, R06a
- [18] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、Ana López-Sepulcre、山本智、Bertrand Lefloch、Cecilia Ceccarelli, 「Class 0 原始星 IRAS 16293-2422 におけるエンベロープの速度構造解析」, P123a
- [19] 坂井南美、Ana López-Sepulcre、大屋瑠子、今井宗明、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也, 「Unbiased Chemical Survey of Protostellar Sources in Perseus」, P124a
- [20] 吉田健人、坂井南美、渡邊祥正、Ana López-Sepulcre、山本智、Bertrand Lefloch、ASAI メンバー, 「星形成領域における  $\text{c-C}_3\text{H}_2$  の  $^{13}\text{C}$  同位体存在量異常」, P125a
- [21] 海老澤勇治、猪熊宏士、渡邊祥正、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智, 「OH 18 cm 線の吸収線と構造形成の関係の研究」, P126a
- 【天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京、2016 年 3 月 14-17 日】
- [22] 渡邊祥正、西村優里、坂井南美、徂徠和夫、原田ななせ、山本智, 「棒渦巻銀河 M83 における GMC スケールの CS と  $\text{CH}_3\text{OH}$  分布」, R10a
- [23] 西村優里、下西隆、渡邊祥正、坂井南美、山本智, 「低重元素量の矮小銀河における CO 輝線の観測」, R11a
- [24] 坂井南美、大屋瑠子、Ana López-Sepulcre、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、相川祐理、Cecilia Ceccarelli、Bertrand Lefloch、Claudine Kahane、Emmanuel Caux、Charlotte Vastel, 「Centrifugal Barrier of Infalling-Rotating Envelope around the Class I Protostar IRAS 04365+2535」, P101a
- [25] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、Cecilia Ceccarelli、Bertrand Lefloch、Cécile Favre, 「Class 0 原始星 IRAS 16293-2422 におけるエンベロープの速度構造解析 (2)」, P102a
- [26] 吉田健人、坂井南美、渡邊祥正、Ana López-Sepulcre、山本智, 「星形成領域 L1527 における CCH および CCD の高分解能観測」, P104a
- [27] 海老澤勇治、猪熊宏士、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」, P107a
- [28] 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」, P219a
- 【その他】
- [29] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智, 「若い低質量原始星に付随するエンベロープガスの速度構造の解析」, 星形成の諸階層 -銀河から惑星まで-, フォレスト箱根、2015 年 9 月 14-16 日
- [30] 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の原始星天体に対する重水素濃度のサーベイ観測」, 星形成の諸階層 -銀河から惑星まで-, フォレスト箱根、2015 年 9 月 14-16 日



## II

# Summary of group activities in 2015



# 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, Nami Sakai, 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 first commissioning run was performed in September to October, 2011. 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. We are expecting the scientific run from 2015.

[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.