

I

# 研究室別 2014年度 研究活動報告



## 0.1 山本研究室

### 0.1.1 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。

**【動き出した ALMA (アルマ)】** ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) は、チリの標高 5000 m のアタカマ高原に作られる 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、日本、北米、欧州による共同建設が進んでいる。2011 年 10 月から部分運用が始まっており、我々のグループでも成果が出つつある。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、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。

### 0.1.2 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。本研究室では、これらの点を中心に、ALMA などを用いて幅広い研究を進めている（図 0.1.1）。

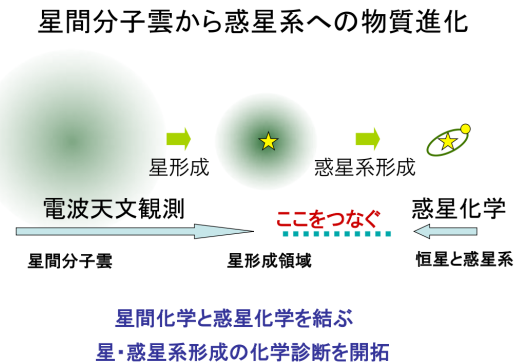


図 0.1.1: A schematic illustration of our goal

**【原始惑星系円盤外縁部で劇的な化学変化】** 昨年度、ALMA を用いて、おうし座分子雲にある原始星 L1527 の高感度・高空間分解能観測を行い、原始星円盤が形成される様子を調べた。いくつかの分子のスペクトル線観測から、中心星から半径 100 AU の位置に回転落下円盤の遠心力バリアがあることを発見し、そこで劇的な化学組成の変化が起きていることを示した。遠心力バリアは原始星円盤形成の最前線なので、それを観測的に捉えたことは大きな意義がある。本年度は、ALMA 観測データの解析を進め、遠心力バリアを境にどのような分子組成の変化が起きているかを詳しく調べた。その結果、 $CCH$  や  $c-C_3H_2$  のような炭素鎖関連分子と  $CS$  は遠心力バリアの外側に主に存在していることが示された。逆に  $SO$  や  $CH_3OH$  は遠心力バリアの近傍で急激に増加し、その内側にまである程度存在している。一方、 $H_2CO$  は全体に広がって存在していることがわかった（図 0.1.2）。そこで、 $H_2CO$  に対する分子の存在量比を見積もったところ、遠心力バリアを境に存在量の大きな変化が確認された（図 0.1.3）。遠心力バリア近傍で

は弱い降着衝撃波が生じるため、ガス中に含まれる塵（星間塵）表層に凍りついていた SO や  $\text{CH}_3\text{OH}$  などが蒸発してくる。原始星円盤の赤道面では密度が非常に高く ( $> 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ) 温度も低い ( $< 30 \text{ K}$ ) ので、遠心力バリアを通過した後は、炭素鎖関連分子などの不揮発性の分子は星間塵に凍りつく。円盤形成に伴ってこれほどまでの激しい分子組成変化がおこることは予想すらされていなかった。この天体については、ALMA によるさらに高空間分解能の観測が予定されており、今後の発展が期待される。

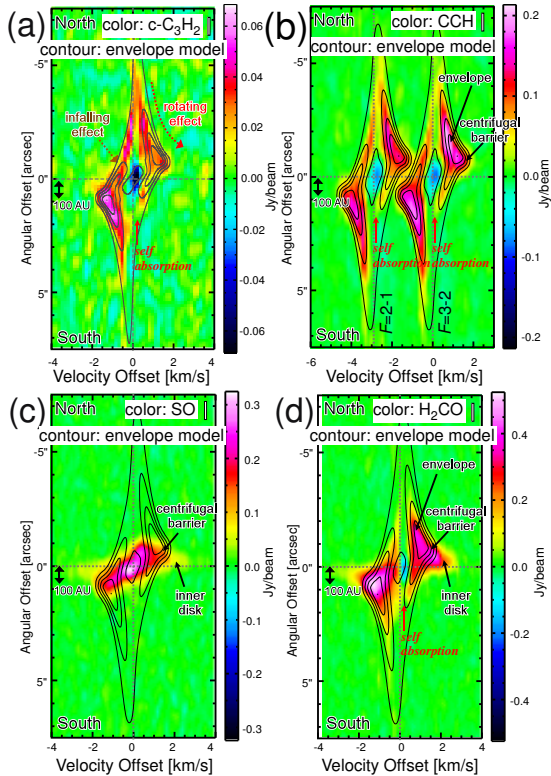


図 0.1.2: Position-velocity diagrams of  $c\text{-C}_3\text{H}_2$ , CCH, SO, and  $\text{H}_2\text{CO}$  observed toward L1527. Contours are intensities expected by the infalling-rotating envelope model. SO exists around the centrifugal barrier, while  $c\text{-C}_3\text{H}_2$ , CCH reside in the envelope.  $\text{H}_2\text{CO}$  exists in the overall region.

**【低質量原始星 L1527 におけるアウトフロー】** CS ( $J=5-4$ ) 輝線の高分解能観測 ( $\sim 0''.7$ ) の結果、原始星から南北に伸びるほとんど edge-on のエンベロープ成分と、バタフライ状に広がる弱いアウトフロー成分が確認された。回転落下エンベロープガスのモデルと観測された速度場との比較から、このエンベロープの向きは、完全な edge-on からエンベロープの西側の面が手前に向くよう  $5^\circ$  程度傾けた状態であることがわかった。またアウトフローの速度場は典型的な放物面モデルで説明された。この傾きの方向は、従来報告されていたものと反対であり、このことは、アウトフローの軸とエンベロープの回転軸が必ずしも

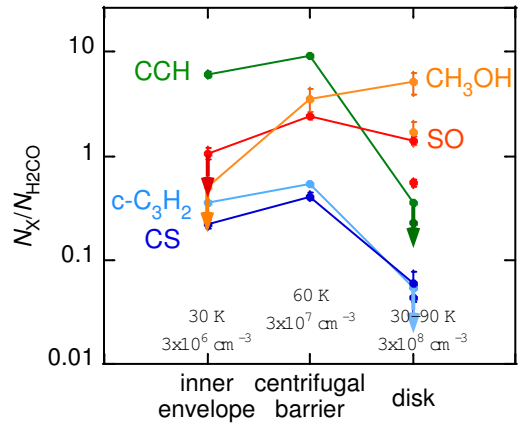


図 0.1.3: A Change in molecular abundances across the centrifugal barrier. Arrows represents upper limits.

平行でないこと、あるいはアウトフローの軸が歳差運動をしている可能性を示唆する。

**【L1527 における  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  分子の  $^{13}\text{C}$  同位体比異常】** 野辺山 45 m 望遠鏡および IRAM30 m 望遠鏡を用いた L1527 に対する 1-3 mm 帯のラインサーベイ観測のデータを解析し、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$  分子と 2 種類の  $^{13}\text{C}$  同位体の  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比を求めた。その結果、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$  の同位体比は元素の同位体比 (60-70) より有意に高いことが明らかになった。 $\text{C}^+$  を起源として生成される分子は  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比が高くなるのが理論的に予測されており、この結果はそれを支持する。さらに、2つの同位体種間で  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比が異なることを示した。この結果は、この分子が生成される反応過程の理解に強い制限をあたえるものである。

**【L1527 における  $c\text{-C}_3\text{D}$  の検出】** L1527 のラインサーベイ観測では、 $c\text{-C}_3\text{H}$  分子が非常に強く検出され、関連分子である  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  や  $l\text{-C}_3\text{H}$  に対する存在量比が他天体に比べ高いことがわかった。これは、WCCC の効果によるものと考えられる。それに伴い、 $c\text{-C}_3\text{H}$  の重水素化分子である  $c\text{-C}_3\text{D}$  を分子雲で初めて検出した。 $c\text{-C}_3\text{H}_2$  および  $l\text{-C}_3\text{H}$  の重水素化分子  $c\text{-C}_3\text{HD}$ 、 $c\text{-C}_3\text{D}_2$  および  $l\text{-C}_3\text{D}$  の輝線も検出した。これらの分子種の D/H 比の関係は、WCCC での生成過程から予測されるものと矛盾しない。

**【IRAS 16293-2422 における回転落下エンベロープ】** IRAS 16293-2422 は、へびつかい座にある Class 0 原始星連星 (Source A, B) である。この天体は、原始星付近の暖かい領域に飽和有機分子を多く含む典型的なホットコリノとして知られる。今回、天体の向きがより edge-on に近い Source A について、アーカイブデータの再解析を行った。解析に用いた輝線は、 $\text{C}^{34}\text{S}$  (SMA) と  $\text{HCOOCH}_3$  (ALMA) である。再解析の結果、どちらの輝線でも北東-南西方向に伸びるエンベロープ成分が確認された。 $\text{C}^{34}\text{S}$  の速度構造は、L1527 と同様の回転落下エンベロープのモデルで再現されることがわかった。一方、 $\text{HCOOCH}_3$  の分布は遠心力バリア付近に集中していることがわかった。このことは、この天体の特徴である飽和有機分子が、



遠心力バリアでの降着衝撃波によって星間塵から蒸発している可能性を示唆する。

**【ペルセウス座分子雲における原始星天体の分子組成の多様性の統計的研究】** 低質量原始星天体の化学的多様性については、ホットコア天体と WCCC 天体の2つの極端なケースが見出されてきた。しかし、確実なホットコア天体は5個程度、WCCC 天体については2個であり、他の大多数の原始星の分子組成の特徴は明らかになっていない。そこで、ペルセウス座分子雲に含まれる原始星天体 37 個について、分子組成の特徴を調べる統計的研究を、野辺山 45 m 電波望遠鏡と IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いてスタートした。予備的解析から、多様性の特徴が見えつつある。

**【TMC-1 における大型飽和有機分子の検出】** 飽和有機分子は星形成領域における特徴的な分子として知られている。近年の研究により、それらが星なしコアの星間塵上に相当量存在していることがわかってきた。低温分子雲における飽和有機分子の生成過程についての理解を深めるため、TMC-1 に対して  $\text{CH}_3\text{OH}$  のマッピング観測を行った。その結果、 $\text{CH}_3\text{OH}$  がコア周辺の低密度領域で豊富であることを見出した。そこで、 $\text{CH}_3\text{OH}$  のピーク強度位置で  $\text{CH}_3\text{CHO}$  および大型有機分子の観測を行った (図 0.1.4)。その結果、 $\text{CH}_3\text{OCHO}$  を TMC-1 において初検出し、 $\text{CH}_3\text{OCH}_3$  を暫定的に検出した。これは、TMC-1 という若い進化段階にある星なしコアにおいて、既に星間塵上で大型飽和有機分子が生成されていることを示唆する重要な結果である。

**【星形成領域における重水素濃縮度】** 原始星形成に伴う重水素濃縮度の変化を確立する目的で、低質量原始星形成領域 L1551 IRS5, IRAS16293-2422 に対して重水素濃縮度の分布を観測した。原始星形成に伴う温度上昇のため、原始星近傍では重水素濃縮度が減少する。イオン種と中性分子種では減少速度が違い、中性分子種の場合の減少のタイムスケールは  $10^5$  年程度と予想される。観測では、この予想と整合する結果が得られた。

**【大質量星形成領域 NGC 2264 ラインサーベイ】** NGC 2264 C 領域はオリオン星雲に次ぎ太陽系に近い大質量星形成領域であり、その中で最も重い CMM3 には力学年齢が 140-2000 年の分子流が付随しており、非常に若い段階の原始星であると考えられる。若い段階の大質量原始星の化学組成を調べるため、国立天文台野辺山 45 m 鏡に搭載された T70 受信機を用いて、68-115 GHz 帯の分子輝線サーベイを実施した。観測の結果、265 本の輝線を検出し 35 種類の分子と 29 種類の同位体種を同定した。特に、 $\text{C}_4\text{H}$ 、 $\text{HC}_5\text{N}$ 、 $\text{C}_3\text{S}$  などの炭素鎖分子の輝線強度が相対的に強く、代表的な Hot Core である Orion KL とはかなり異なる化学組成を持つことがわかった。

**【HCL2 領域における OH 吸収線の解析】** おうし座の分子雲 HCL2 に対して、Effelsberg 100 m 望遠鏡を用いて OH 分子の基底状態遷移の観測を行った。この遷移は 1612 MHz, 1665 MHz, 1667 MHz, 1720 MHz の 4 本の超微細構造線からなり、それらのうち 1612 MHz の遷移が宇宙背景放射に対する吸収線として観測された。吸収線を説明するため、OH 分子

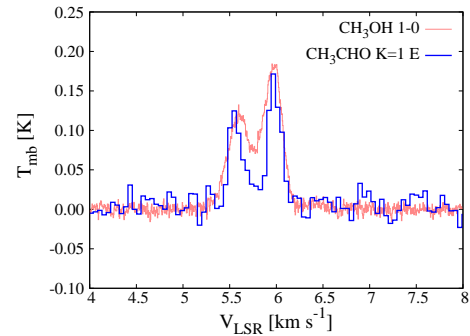


図 0.1.4: Spectra of  $\text{CH}_3\text{OH}$  and  $\text{CH}_3\text{CHO}$  observed toward TMC-1, showing a similar double peaked profile.

の統計平衡計算を行ったところ、吸収を起こしている雲の運動温度は 50 K 程度であることが示された。また、1612 MHz 遷移は 40 K 程度以上で吸収線、40 K 程度以下で輝線となることがわかり、良い温度計となり得ることもわかった。HCL2 の東側の希薄な星間雲と HCL2 本体についてストリップスキャン観測で温度分布を調べたところ、いずれも雲の中心部分で温度が下がり、OH 分子の柱密度が上昇することがわかった。分子雲をとりまく希薄な星間雲の温度分布は、分子雲形成の理解につながる重要な知見であり、OH 分子の観測でその測定ができることを示したことは大きな意義がある。

### 0.1.3 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。

**【M51 の渦状腕における分子分布】** 近傍の円盤銀河 M51 の渦状腕に対して、CRAMA 干渉計を用いたイメージング観測を実施した。観測した領域は、IRAM 30 m を用いてラインサーベイを実施した 2 点を含む領域である。観測の結果、5-7'' 程度の空間分解能で  $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$ 、CN、CS、 $\text{CH}_3\text{OH}$ 、HNC の分布を明らかにすることに成功した (図 0.1.5)。それぞれの分子の分布が異なることから、数 100 pc ス

ケールでは渦状腕において化学組成に違いが生じることが明らかになった。一方で、星形成領域で存在量が顕著に増加する分子は見られないことから、このスケールの化学組成は星形成活動よりガスダイナミクスなどの影響を受けいていると考えられる。

**【NGC 3627 における化学組成】** 棒渦巻銀河である NGC 3627 のバーエンドに対して、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 3 mm 帯の 12 種の分子輝線 (CCH, HNCO, HCN など) の観測を行った。観測したバーエンドは、渦状腕と比較して星形成効率が 5 倍高い領域であり、星形成活動が kpc スケールの分子ガス化学組成に及ぼす影響を探るのに適している。観測の結果、M51 の渦状腕と比較して CS や  $\text{HCO}^+$  が増加している一方で、M51 では比較的強い輝線強度で検出できた HNCO は検出されなかった。このような化学組成の違いの原因として、活発な星形成に伴うフィードバックの影響が考えられる。一方で、比較対象が NGC 3627 とは別の銀河であるため、重元素の組成の違いを反映している可能性も否定できない。そこで、単一鏡及び干渉計を用いた NGC 3627 の渦状腕での観測を計画している。

**【大マゼラン雲におけるラインサーベイ】** 大マゼラン雲 (The Large Magellanic Cloud: LMC) は、近傍にある矮小不規則銀河であり、重元素量が我々の銀河系の半分程度と低いことで知られている。昨年度に引き続き、この銀河の中にある分子雲を対象に、オーストラリアの Mopra 22 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行った。昨年度と合わせて、観測時間は 450 時間にのぼり、計 7 つの分子雲について高感度のデータを得ることができた。その結果、7 つの分子雲の化学組成は星形成段階によらず類似していること、LMC の分子雲では我々の銀河系の分子雲と比べ、CCH 分子が多く、 $\text{CH}_3\text{OH}$  分子が少ないことを見出した。これは重元素量の少なさを反映した LMC の特徴であると考えられる。

**【IC10 におけるラインサーベイ】** 上記の LMC の観測結果は、低重元素量銀河の分子雲における化学組成の質的特徴を浮き彫りにした。LMC で見られた CCH 分子が豊富で  $\text{CH}_3\text{OH}$  が少ないという特徴が低重元素量の銀河で一般に見られるものであるのか検証するため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて、LMC よりもさらに重元素量の低い銀河である IC 10 の分子雲をラインサーベイ観測した。結果として、複数の分子の輝線を検出することができ、LMC で見られた特徴がこの銀河でも見られることがわかった。

**【銀河系分子雲のマッピングラインサーベイ】** 系外銀河における分子ガスの化学組成と、銀河系の分子ガスの化学組成を比較するために、銀河系内の大質量形成領域 W51 に対してマッピングラインサーベイを Mopra 22 m 望遠鏡で行った。観測した領域全体 (50 pc × 50 pc) でスペクトルを平均すると星形成の影響は薄められ、広がった希薄な分子ガスの化学組成が優勢になる。その結果は M 51 などの系外銀河で観測されるスペクトルと類似することがわかった。同様に、銀河系内の大質量星形成領域 W3(OH) に対しても、野辺山 45 m 望遠鏡を用い、10 pc に相当する領域を 3 mm 帯の分子スペクトル線でマッピング観測した。現在、詳細な解析が進行中である。

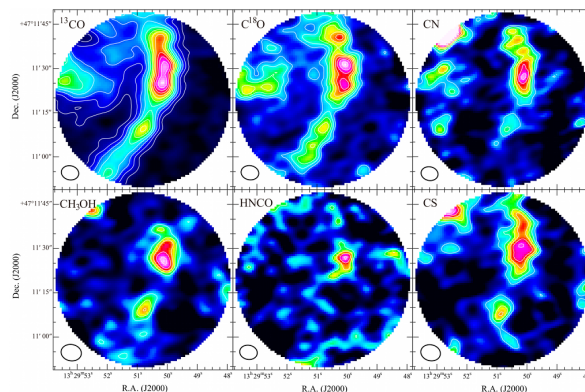


図 0.1.5: Molecular distributions in M51

#### 0.1.4 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 (ヘテロダイミクサ) 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・ボロメータ (HEB) ミクサ素子である。HEB ミク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 搭載 THz 受信機の開発】** THz 帯には星間空間における化学反応の始点となるような基本的な原子・分子の輝線が存在する。それらの分子の観測は星間空間における化学反応の根幹を捉える上で基本的な重要性を持っている。THz 帯での高空間分解能観測を行うことを目指して、大口径地上望遠鏡搭載に向けた THz 帯受信機の開発を進めている。開発している受信機は ALMA カートリッジタイプで、900 GHz 帯と 1.5 THz 帯の 2 つの周波数帯を同時に観測できる。導波管型 HEB ミクサを使用しており、IF 帯域は 0.8-1.3 GHz である。HEB ミクサ素子は東京大学の研究室で開発・作成し、実験室で試験したミクサ雑音温度は 809 GHz で 390 K、1475 GHz で 490 K を達成している。1.5 THz 帯の性能は量子雑音の 7 倍程度であり、これは導波管型の HEB ミクサとしては世界最高の性能である。これまでの望遠鏡搭載実験を踏まえ、局部発振器の最終通倍器をカートリッジ内部に設置し、冷凍機の機械振動を排除できるよう改良を行った。これにより、受信機の出力量安定性を向上させるとともに、運用時の負担軽減を計っている。カートリッジ冷却試験用デューワーを新たに導入し、実際の運用を想定した状況で性能



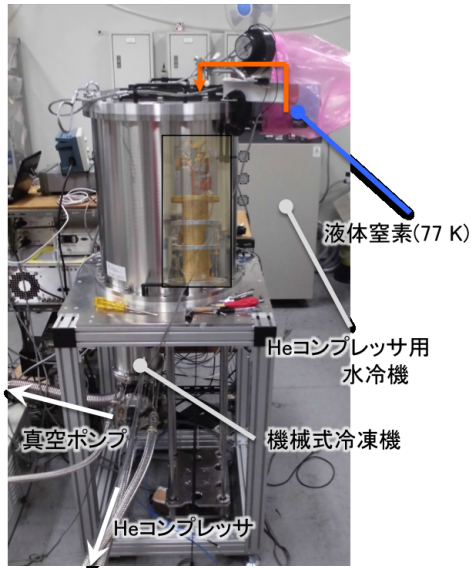


図 0.1.6: A test cryostat for evaluation of the THz HEB mixer receiver

評価を行っている (図 0.1.6)。一層の低雑音化、広 IF 帯域化を目指しての HEB ミキサ素子の改良を進めるとともに、光学系・導波管回路の改良による観測 RF 帯域の広帯域化の研究も進めている。

**【 THz-TDS による超伝導薄膜の評価】** HEB ミキサの心臓部である超伝導薄膜の物性を調べることは、その動作原理を理解し、検出性能を向上させるために重要である。本年度より、東大物性研の浅原彰文氏と末元徹教授との共同研究により、テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) を用いた超伝導薄膜の物性評価実験を開始した。当研究室で作製した NbTiN 薄膜 (30 nm) のテラヘルツ伝導特性 (0.2 2 THz) を転移温度近傍 (11 K) について測定し、Mattice-Bardeen モデル解析によって超伝導特性に関する情報を抽出した。

**【準光学型 THz 帯 HEB ミキサの開発】** 有限境界要素法による Singular ソフトウェアをもちいて、1.9 THz 準光学ツインスロットアンテナの周波数応答とビームパターンをシミュレーションし、設計パターンの改良を行った。機械式 4K 冷凍機の振動に伴って局部発振器からの入射パワーがゆらぎ、これが HEB ミキサの出力変動を誘起する。この振動の影響を最小限に抑えるように GRASP シミュレータをもちいて光学伝送系の最適化を行った。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。

#### <受賞>

- [1] 大屋瑠子, Poster Award, Revolution in Astronomy with ALMA - The 3rd Year, Tokyo International Forum Tokyo, December 8-11, 2014.

#### <報文>

(原著論文)

- [2] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51 in the 3 mm and 2 mm Bands", *ApJ*, 788, 4 (2014).
- [3] Sakai, N., Oya, Y., Sakai, T., Watanabe, Y., Hirota, T., Ceccarelli, C., Kahane, C., Lopez-Sepulcre, A., Lefloch, B., Vastel, C., Bottinelli, S., Caux, E., Coutens, A., Aikawa, Y., Takakuwa, S., Ohashi, N., Yen, H.-W., & Yamamoto, S., "A Chemical View of Protostellar Disk Formation in L1527", *ApJ*, 791, L38 (2014).
- [4] Oya, Y., Sakai, N., Sakai, T., Watanabe, Y., Hirota, T., Lindberg, J.E., Bisschop, S.E., Jorgensen, J.K., van Dishoeck, E.F., & Yamamoto, S., "A Substellar-Mass Protostar and Its Outflow of IRAS15398-3359 Revealed by Subarcsecond Resolution Observations of H<sub>2</sub>CO and CCH", *ApJ*, 795, 152 (2014).
- [5] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., and Yamamoto, S., "Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1", *ApJ*, 802, 74 (2015).
- [6] Shiino, T., Furuya, R., Soma, T., Watanabe, Y., Sakai, T., Ling, J., Maezawa, H., Yamakura, T., Sakai, N., and Yamamoto, S., "Low-Noise 1.5 THz Waveguide-Type Hot-Electron Bolometer Mixers Using Relatively Thick NbTiN Superconducting Film", *JJAP*, 54, 033101 (2015).

(国内雑誌)

- [7] 山本 智, 「もっと化学を」, 日本天文学会 天文月報, Vol. 107, 620, 2014.

(学位論文)

- [8] 柴田大輝, "The Behavior of the Deuterated Species after Birth of Protostars" (博士論文)
- [9] 大屋瑠子, 「ALMA を用いた太陽型原始星のエンベロープおよびアウトフローの研究」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Sakai, N., "A Drastic Chemical Change in Protostellar Disk Formation", The Early Phase of Star Formation, Ringberg, Germany, 2-6, Jun, 2014
- [11] Watanabe, Y., Sakai, N., Nishimura, Y., Sorai, K., & Yamamoto, S., "Chemical Compositions of Spiral Arm Clouds in M51", Behind the curtain of dust - the molecular view of activity in (U)LIRGs Sexten, Italy, 14 - 18, July, 2014

ポスター発表

#### **【Revolution in Astronomy with ALMA - The 3rd Year, Tokyo, December 8-11, 2014】**

- [12] Watanabe, Y., Sakai, N., Nishimura, Y., Sora, K., & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51".

- [13] Lopez-Sepulcre, A., Taquet, V., Ceccarelli, C., Neri, R., Kahane, C., & Charnley, S.B., "Complex organics in the planet formation region of two solar-type protostars"
- [14] Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., & Yamamoto, S., "Origin of Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1".
- [15] Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Quiescent Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud"
- [16] Oya, Y., Sakai, N., Sakai, T., Watanabe, Y., Yamamoto, S., Sakai, T., Hirota, T., Lindberg, J.E., Bisschop, S.E., Jørgensen, J.K., & van Dishoeck, E.F. "Submillimeter-Wave Observations toward the Low-Mass Protostar IRAS 15398-3359 at Sub-arcsecond Resolution". (Poster Award 受賞)
- [17] Ebisawa, Y., Inokuma, H., Watanabe, Y., Sakai, N., Menten, K.M., & Yamamoto, S., "Effects of Line Overlap in Statistical Equilibrium Calculations of OH".
- [18] Yoshida, K., Sakai, N., Tokudome, T., Watanabe, Y., Takano, S., Lefloch, B., & Yamamoto, S., "Abundance Anomaly of the  $^{13}\text{C}$  Isotopic Species of  $c\text{-C}_3\text{H}_2$ "
- 招待講演
- [19] Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K. & Yamamoto, S., "Spectral Line Survey toward Spiral Arm of M51", Chemical Diagnostics in the ALMA/NOEMA Era - MPIA/ISM-SPP workshop 2014 The Max Planck Institute for Astronomy, Heidelberg, Germany, 21-23, July, 2014.
- [20] Sakai, N. & Yamamoto, S., "Chemical Evolution of Star-Forming Cores toward Protostellar/Planetary Disks", Workshop on Interstellar Matter 2014, Hokkaido University Sapporo, October 16 - 18, 2014.
- [21] Sakai, N., "Protostellar Disk Formation Traced by Chemistry", Revolution in Astronomy with ALMA - The 3rd Year, Tokyo International Forum Tokyo, December 8-11, 2014.
- [22] Sakai, N., "Chemical Evolution in Star and Planet Formation", 6th RSC-CSJ Joint Symposium on Advanced Measurements for Chemistry, Nihon University, Funabashi, March 27, 2015.
- (国内会議)
- 一般講演
- 【天文学会 2014 年秋季年会、山形大学、2013 年 9 月 10 - 12 日】**
- [23] Sakai, N. Oya, Y., Watanabe, Y., Yamamoto, S., Hirota, T., Aikawa, Y., Ohashi, N., Takakuwa, S., Yen, H-W., Ceccarelli, C., IPAG group members. "A Chemical View of Protostellar-Disk Formation in L1527" P115a
- [24] 西村優里、渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「M51 の渦状腕における 70 GHz 帯の輝線観測」、R11a
- [25] 渡邊祥正、坂井南美、山本智、酒井剛、廣田朋也、「若い大質量原始星 NGC 2264 CMM3 における 70 GHz 帯分子輝線サーベイ」、P105a
- [26] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、「若い原始星に付随するエンベロープおよびアウトフローのモデル解析」、P116a
- [27] 海老澤勇治、猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten, 山本智、「OH 分子の超微細構造遷移線における Line Overlap を含めた統計平衡計算」Q47b
- [28] 吉田健人、徳留智矢、坂井南美、渡邊祥正、山本智、高野秀路、NRO ラインサーベイメンバー、Bertrand Lefloch, ASAI メンバー、「NRO 45 m/IRAM 30 m を用いた L1527 ラインサーベイ」、P126b
- 【天文学会 2015 年春季年会、大阪大学、2014 年 3 月 18 - 21 日】**
- [29] 渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智「Multi Line Observation toward Spiral Arm of M51 with the CARMA」、R09a
- [30] 相馬達也、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「Detection of Complex Organic Molecules in Starless Core; TMC-1」、P116a
- [31] 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、「大マゼラン雲の分子雲に対する 3 mm 帯スペクトラルラインサーベイ II」、Q33a
- [32] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「ALMA によるおうし座 Class 0 原始星 L1527 の観測」、P129a
- [33] 海老澤勇治、猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten, 山本智、「HCL2 領域における OH 吸収線と構造形成の関係の研究」、P114a
- [34] 吉田健人、坂井南美、西村優里、Lopez-Sepulcre, A., 渡邊祥正、Lefloch, B., 山本智、「低質量星形成領域 L1527 における  $c\text{-C}_3\text{D}$  の検出」、P115a
- [35] 山本智、相馬達也、吉田健人、海老澤勇治、西村優里、渡邊祥正、椎野竜哉、大口脩、酒井剛、小嶋崇文、Gonzalez, A., 「ASTE 10 m 望遠鏡搭載 THz 受信機の開発」、V119c
- (書籍)
- [36] 坂井南美、日本物理学会編「宇宙の物質はどのようにできたのか 素粒子から生命へ」日本評論社、第 6 章 (公開講演)
- [37] 坂井南美「生まれつつある原始惑星系円盤で劇的な化学変化」、科学ライブショー「ユニバース」、国立科学技術館、2014 年 4 月 5 日
- [38] 坂井南美「アルマ望遠鏡で挑む星の誕生と星間化学」、朝日カルチャーセンター「アルマ望遠鏡が解き明かす宇宙の謎」、横浜、2014 年 8 月 30 日



## II

# Summary of group activities in 2014



# 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., gAn Unbiased Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTEh, *ApJ*, **745**, 126 (2012).

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

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