

I

研究室別 2012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、星・惑星系形成とそこで物質進化を、電波観測（主にミリ波、サブミリ波、テラヘルツ波観測）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。

【動き出した ALMA (アルマ)】我々は国内外の大型電波望遠鏡を駆使して、星・惑星系形成領域の観測を展開しているが、感度、分解能ともに十分ではない。それを解決するのが ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) である。ALMA 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初期成果が出つつある。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るであろう。

【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展開していきたい。

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。WCCC 天体では、原始星近傍で CH_4 が星間塵から蒸発し、それが原料となって炭素鎖分子が爆発的に形成されている。ホットコリノ天体とは対照的に、WCCC 天体では大型飽和有機分子は検出されない。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、分子組成の違いの惑星系への伝播についても大きな興味もたれ始めている。本研究室では、低質量星形領域を中心に、電波観測による幅広い研究を進めている。

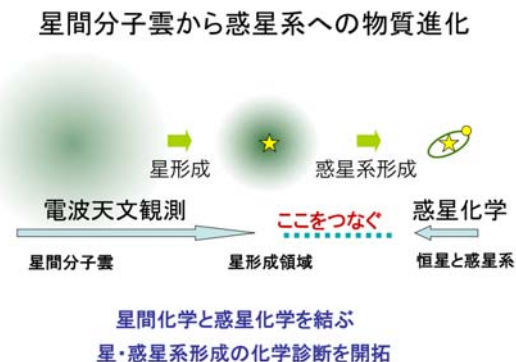


図 0.1.1: A schematic illustration of our goal

【L1527 のラインサーベイ】おうし座の L1527 ($d = 137$ pc) は WCCC を示す低質量原始星である。我々はその分子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。これまでに 79 - 116 GHz の周波数範囲の観測を完了し、L1527 の化学組成の全貌を明らかにした。この天体では種々の炭素鎖分子が豊富に存在することが改めて確認された。なかでも $c-C_3H_2$ は非常に

豊富で、その ^{13}C 同位体種を2種類とも検出できた。さらに、重水素置換体 $c\text{-C}_3\text{HD}$ とともに2重水素置換体 $c\text{-C}_3\text{D}_2$ の検出にも成功し、 $c\text{-C}_3\text{HD}/c\text{-C}_3\text{H}_2$ 比が0.07、 $c\text{-C}_3\text{D}_2/c\text{-C}_3\text{H}_2$ 比が0.002と求められた。異常な重水素濃縮は起こっておらず、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ が豊富にあるために検出できたものと見られる。また、関連分子であるシクロプロペノン ($c\text{-C}_3\text{H}_2\text{O}$) も検出できた。この分子はこれまで銀河中心方向で検出されていたが、近傍分子雲での検出は初めてである。その検出は、L1527が新星間分子の探査の新しい対象天体となり得ることを意味している。

【ALMAによるL1527の高分解能観測】ALMAの部分運用(Cycle 0)でL1527の観測を行った。1.2 mm帯、0.8 mm帯の分子スペクトル線の強度分布を0.7秒角程度の分解能で調べた。その結果、CCH、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ などの炭素鎖分子は、原始星から半径140 AU程度のところで最も豊富となり、中心部分で減少している様子が捉えられた。ドップラー効果の解析から、これらの分子が回転しながら原始星円盤に落ち込んでいる様子が明瞭に捉えられた。また、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ の高励起スペクトル線はそれより内側からも観測された。このことは、炭素鎖分子が原始星円盤にまでもたらされていることを意味している。一方、SOや CH_3OH は原始星円盤のみに存在する。このように、原始星円盤の形成に伴って、化学組成が劇的に変化する様子が捉えられた。 CH_3OH のスペクトル線は非常に微弱であることから、中心部分においてもその存在量は多くないと予想される。WCCC天体でホットコリノに特有の飽和有機分子が少ないことが、原始星近傍においても確認された。

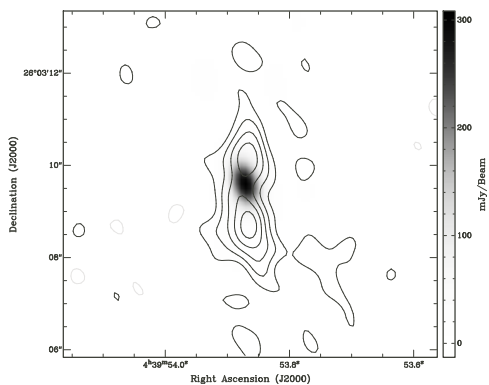


図 0.1.2: The CCH emission (contours) superposed on the continuum emission (gray scale) observed toward L1527 with ALMA

【Serpens SMM4のラインサーベイ】Hot Corinoの化学組成の全貌を明らかにする目的で、我々はHot Corino天体であるSerpens SMM4のラインサーベイ観測を推進している。2011年度のASTEによる345 GHzの観測に加え、3 mm帯での補足観測を野辺山45 m電波望遠鏡を用いて実施した。ASTE観測で検出した分子に加え、新たに HC_3N 、 CH_3CCH 、

C_4H 、 HNCO 、 SiO を検出した。重水素化合物や HCO^+ の同位体種のスペクトルの線幅は、 CH_3OH や H_2CO の線幅と比較して狭いなど、分子による線幅の違いが見られた。一般に線幅が狭い分子の方が回転温度が低い傾向が見られる。これは、存在する領域が分子ごとに違うことを示唆している。

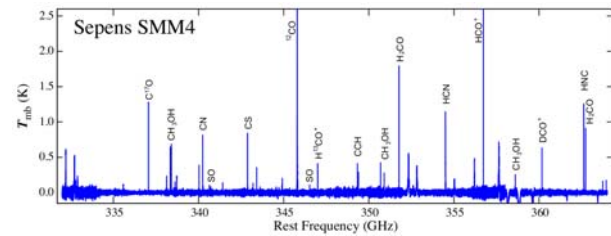


図 0.1.3: Spectral line survey in the 345 GHz band toward the low-mass protostar, Serpens SMM4, with ASTE

【L1157 B1における衝撃波化学】2008年から2011年にかけて、野辺山45 m電波望遠鏡を用いて低質量星形成領域L1157 mm周辺の衝撃波領域、L1157 B1におけるラインサーベイを行った。そこで検出された分子について柱密度を計算するとともに、他の星形成領域と比較のため、どの星形成領域でも多量に存在する CH_3OH を基準に規格化した存在量比を求めた。その結果、 HCOOH 、 HCOOCH_3 、 CH_3CHO などの複雑な有機分子は、低質量星形成領域であるIRAS 16293-2422ではL1157 B1よりも存在比が高く、大質量星形成領域のSgr B2やOrion KLではL1157 B1と同程度かより少ない存在比となる傾向が見られた。一方、SOや SO_2 のような比較的単純な分子では大質量星形成領域でもL1157 B1より存在比が高いものが見られた。L1157 B1の衝撃波を引き起こした双極分子流の力学的年齢は 1.8×10^4 yr程度と見積もられている。 HCOOH や HCOOCH_3 などの複雑な有機分子は、L1157 B1の双極分子流の力学的年齢内では気相反応で生成できないため、以前に星間塵上で生成していたものが衝撃波によって蒸発し、観測されたと考えられる。一方、SOなどの単純な分子は、星間塵から前駆物質が蒸発した後、 10^4 yr程度の時間で、気相中で十分な量を生成することが可能である。このような生成過程の違いのため、分子ごとの存在比の違いが現れると考えられる。

【低質量星形成領域の重水素濃縮】原始星形成に伴う重水素濃縮の変化を確認する目的で、低質量原始星形成領域L1551、IRAS16293-2422に対して重水素濃縮度分布を調べた。L1551では原始星方向で DCO^+ の重水素濃縮度が減少している一方で、DNCの重水素濃縮度は周辺と変わらないことがわかった。同時に観測した N_2H^+ と比較することで、 DCO^+ の重水素濃縮度に対しては原始星近傍の高温領域では周囲の低温領域(エンベロープ)と比較して重水素濃縮度が有意に減少していること、また、DNCの重水

素濃縮度は変化していないことを定量的に示すことができた。原始星が形成されて温度が上昇すると重水素濃縮が解消されると考えられるが、この解消速度がイオンに比べて中性分子が遅いためと考えられる。中性分子の重水素濃縮度が原始星形成直後の状態を保持していれば、その観測を通して原始星形成直前の物理状態についての知見が得られることになる。一方、IRAS16293-2422 ではこのような明確な差異は見られなかった。それは、周囲の低温のエンベロープの影響によるものと考えられ、その寄与を除くことが星形成に伴う重水素濃縮度の変化を調べる上で不可欠と考えられる。

【星なしコアにおける CH_3OH の起源】 CH_3OH は星間分子雲における基本的な有機分子であり、一般に星間塵上で生成され星形成活動に伴う温度上昇によって気相中に蒸発してくると考えられている。しかし、TMC-1 (~ 10 K) のような蒸発温度に達していない低温分子雲においても相当量の CH_3OH が検出されており、その生成機構については未だ議論が続いている。我々は、野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて TMC-1(CP) の周辺 150 " 四方のマッピング観測を行った。 CH_3OH の詳細な分布を調べたところ、高密度ガスをトレースすると考えられている C^{34}S と反相している部分があることを見出した。その分布は分子雲全体をトレースする C^{18}O の分布とむしろ類似している。低温下での CH_3OH の脱離機構としては、宇宙線によって生じる紫外線による光脱離の効果が考えられる。その場合、星間塵からの脱離量は密度によらず一定となるため、 CH_3OH は空間的に広く分布することが期待され、観測と矛盾しない。本研究により、低温分子雲においても、星間塵の化学組成が気相中の化学組成に影響を与えている可能性が改めて確認された。

【重水素化分子の精密観測】宇宙における重水素の存在比が $\text{D}/\text{H} \sim 10^{-5}$ であるのに対し、低温の星間分子雲中では、重水素は分子に数%の割合にまで濃縮される。この濃縮度は、星間分子雲の進化とともに増加していくため、星形成前の星間分子雲の進化段階の指標としてよく用いられる。従って、代表的な星間分子雲について、種々の分子の重水素濃縮度を正確に求めておくことは基本的な重要性を持つ。そのような動機から、野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載した 70GHz 帯の受信機を用いて、おうし座の L1527、TMC-1、おおみ座の IRAS15398-3359、Lupus-1A、へびつかい座の IRAS16293-2422 に対し、基本的分子 (HCN , HNC , HCO^+ , C_2H , HN_2^+) の重水素化物のスペクトル線の観測を行った。高い速度分解能で観測をしたことにより、 HN^{13}C 、 DNC でスペクトル線の超微細構造を明瞭に分離して観測できた。この超微細構造を利用し、分子の励起温度を求めると、両者の励起温度が異なる可能性があることがわかった。その原因はまだ不明だが、重水素濃縮度の正確な評価において解決すべき課題である。

【HCL2 領域における CH の分布】おうし座の Heiles Cloud 2 (HCL2) 領域における CH スペクトル線 (波長 9 cm) の観測を Effelsberg 100 m 望遠鏡を用い

て行った。HCL2 領域は炭素鎖分子が豊富な星なしコア TMC-1 や、WCCC 天体 L1527 を含む分子雲である。そのような特徴的な化学組成を生じる環境効果を特定するため、HCL2 領域全体の形成過程に着目して CH の観測を行った。この領域は、全体としてはリング状の構造をしているが、炭素原子 (C) は南東側に、CO 分子は北西側に偏って分布している。これは炭素原子から CO 分子への化学進化に対応しており、北西側から分子雲形成が進んできていることが指摘されている。本観測で、CH の分布は、炭素原子と CO 分子の分布をつなぐように分布していることが確かめられた。CH は炭素原子から CO を生成する際の中間体なので、この分布は上記の化学進化の考え方を支持する。さらに、CH のスペクトルは線幅の細いコア成分と線幅の太いエンベロープ成分からなり、分子雲形成に伴ってエンベロープ成分が消失することもわかった。このように CH のスペクトル線は、分子雲形成の物理・化学過程を研究する上で有用なプローブであることが示された。

【HCL2 領域における OH 吸収線の解析】HCL2 の東にある希薄な星間雲に対して、Effelsberg 100 m 望遠鏡を用いて OH 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。一方、HCL2 本体についても 4 点で観測したところ、1612 MHz 遷移のスペクトルはいずれも輝線と吸収線の 2 つの成分が混在していた。このことは、HCL2 は温かいガスと冷たいガスの 2 層構造になっている可能性を示唆する。

0.1.3 系外銀河の化学組成

巨大分子雲 (GMC) は銀河スケールと個々の星形成を繋ぐ中間階層であり、その形成と進化が近年注目を集めている。個々の GMC の環境・履歴とそこで起こる星形成の規模・形態との関連を確立することは、銀河における星形成史を理解する第一歩である。その手段の 1 つとして、銀河系内の星形成領域で使われてきた化学進化の手法がある。GMC の化学組成は GMC の存在する環境や進化段階に応じて変化すると考えられるため、化学組成から GMC の過去の履歴を推定できる。今後本格的に稼働する ALMA では、近傍銀河において CO 以外の様々な分子が容易に検出されることが期待され、個々の GMC の分子組成を調べることができる。化学進化の手法とこれまでの運動学的な視点と組み合わせることで、GMC の形成・進化に迫りたい。

【M51 の渦状腕に対するラインサーベイ】近傍の円盤銀河 M51 の渦状腕に対して、3 mm および 2 mm

帯のラインサーベイ観測を IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いて実施した。前年度に観測した位置 (P1) の南側に隣接する点 (P2) を新たに観測し、16 輝線、11 種類の分子を検出した。この 2 点の分子組成を比較したところ、ほとんど違いが見られなかった。一方で、P1 は P2 と比較して星形成率と星形成効率それぞれ 2 倍と 1.5 倍高く星形成活動が活発である。CS と HNC から求めた回転温度は 10 K 以下と低温であることから、検出した分子は主に星形成活動の影響をあまり受けていない分子雲中に存在していると考えられる。CO に次いで存在量が高い CH_3OH は星間塵上で生成される分子で、気相で検出されるためには星間塵から蒸発してこなければならない。P1 と P2 で CH_3OH の存在量に違いがないことから、星形成活動が蒸発機構である可能性は低く、分子雲同士の衝突による衝撃波などの別の機構が働いていると考えられる。

【M83 の棒状構造における化学組成】M83 は銀河系近傍の棒渦巻銀河である。棒状構造の付随する分子ガスの化学組成を調べるために、野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて、10 種類の分子について観測を実施した。観測の結果、HCN、 HCO^+ 、CS、 CH_3OH 、 C^{18}O 、 ^{13}CO を検出した。非軸対称な重力ポテンシャルを持つ棒状構造では、内部のガスの軌道が円運動から大きく逸脱する。その結果、分子雲同士の衝突頻度が上昇し衝撃波が卓越すると考えられており、衝撃波のプロープとなる分子の組成が高くなると予想される。しかし、M51 の渦状腕と M83 の棒状構造では衝撃波プロープである CH_3OH の組成には違いは見られなかった。一方で、CS の組成は棒状構造で 4 倍高く、M51 の渦状腕との違いもあることを示唆している。この違いが銀河の個性なのか銀河の構造の違いによるものか区別するために、今後は M83 の渦状腕においても同様な観測を計画している。

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 (ヘテロダインミキサ) の開発が不可欠である。サブミリ波帯においては、SIS ミキサ素子が広く用いられてきた。ジョセフソン接合の非線形性を利用したもので、Nb (ニオブ) を超伝導物質に用いたものは、750 GHz 以下では量子雑音に迫る性能を発揮している。しかし、750 GHz 以上の周波数では、超伝導キャップ間の吸収による損失が増大するため、急激に性能が低下する。そこで、本研究室では、超伝導ホットエレクトロン・ポロメータ (HEB) ミキサ素子の開発を行っている。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。我々は、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。

【HEB ミキサのゲインバンド幅測定】我々の製作した HEB ミキサは世界最高の低雑音を達成している。1.5 THz での受信機雑音温度は 490 K であり、これは量子雑音の約 7 倍に相当する。しかし、一方で我々の受信機は中間周波数帯域を 1.0-1.2 GHz と狭い周波数帯域に取っており、観測上の制限が大きく、特に線幅の大きい天体の観測が困難である。従って、中間周波数帯域の拡張が 1 つの大きな開発課題である。そのためには、一般に超伝導マイクロブリッジを 3 nm 程度まで薄くする (格子冷却) 方策が取られる。しかし、我々の装置では 8 nm 以上の薄膜化は困難であるため、マイクロブリッジの長さを短くして帯域の拡張を図った (拡散冷却)。すると、予想通り利得帯域はブリッジの長さに依存しており、HEB ミキサ中の電子温度にも依存していることが示された (図 4)。また、この測定から得られた NbTiN 薄膜中での電子の拡散係数を用いて電子の冷却タイムスケールを求めると、拡散冷却が格子冷却の約 2 倍の効率で働いていることがわかった。この結果から、現在 0.15 μm であるブリッジ長を 0.1 μm まで短縮できれば約 3 GHz まで中間周波数帯域を伸ばせることがわかり、それに向けた開発研究が進行中である。

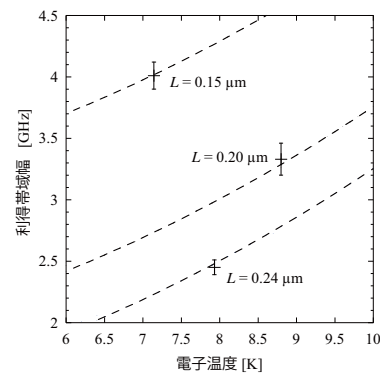


図 0.1.4: Measured IF bandwidths for different microbridge lengths of the HEB mixer

【ワイドバンド導波管ミキサの設計】我々が開発を進めている THz 帯の電波観測を目指した導波管型超伝導 HEB ミキサ受信機は、現在、望遠鏡への搭載・試験観測を行う段階にまで到達している。今後の科学観測における効率化の観点から、受信周波数帯域の広帯域化を目指した受信機的设计を行った。超伝導 HEB ミキサ素子は導波管内部にマウントされている。導波管を用いた電磁波とミキサ素子の結合方式の場合、導波管内の電磁場のモードの制限から観測周波数帯域は比帯域にして 30% 程度しか取れないということが一般に言われてきた。しかし、電磁界シミュレーションを用いて導波管内のアンテナ・フィ

ルタ回路等の形状を最適化することで、比帯域が 60%近い受信機を設計できることがわかった。これはテラヘルツ帯の地上からの電波観測においては、0.9 THz の大気窓と 1.3/1.5 THz の大気窓を一つの受信機でカバーできるようになることを意味している。このような設計の受信機を作成・運用することにより、効率のよい天体観測が可能になる。また、将来の ALMA の拡張計画においても応用できると考えられる。

【2012 年度の ASTE 望遠鏡への搭載実験】2011 年度の初めての THz 受信機 ASTE 望遠鏡搭載実験の成功と課題を踏まえ、次の 2 点で受信機の改良を行った。第 1 は局部発振信号の安定化である。局部発振器は受信機デュワーの側面に光学台を介して取り付けられ、信号は準光学的にデュワー内に導かれているため、デュワー全体の機械的振動の影響が避けられない。そこで、局部発振器を取り付ける光学台をより剛性の高いものに変更し、振動による局部発振信号の強度変化をある程度抑圧した。第 2 は完全リモート観測の実現である。2011 年度の受信機では、光学台やバイアス源の調整が手動であったため、局部発振信号の周波数を変更する度に直接望遠鏡下部の受信機室に入って調整する必要があった。今回、光学台とバイアス電源をリモート対応のものに変更し、 GPIB 制御で山麓施設からの制御・観測を可能にした。これらの改良を行い、今年度もこの THz 受信機を ASTE 望遠鏡に搭載した。受信機は予定通り動作し、0.9 THz 帯での R-Sky 測定まで順調に進んだが、望遠鏡施設のトラブルにより観測はキャンセルせざるを得なかった。翌年度に科学観測に再挑戦する計画である。

【ASTE 用 IF システムの改良】本研究室で開発した THz 帯超伝導 HEB 受信機からの中間周波数信号 (IF 信号) を ASTE 望遠鏡に備わっている伝送システムに入力する際、出力信号を増幅・周波数変換する必要がある。今回、中間周波数を 0.8-1.3 GHz に変えるために、IF システムを改良した。フラットな特性や、高地での運用に耐える発熱対策と操作性の良さに留意し、市販のフィルタ、アンプ、アップコンバータを用いて設計・製作した。実験室で評価した上で ASTE 望遠鏡に取り付け、正しい動作が確認できた。

【準光学型 THz 帯 HEB ミクサの開発】ツインスロットアンテナを集積した準光学型の 1.9THz 帯超伝導 NbTiN HEB ミクサ素子の開発を行った。本年は、高周波電磁界シミュレータ HFSS を用いてアンテナ構造の微修正/最適化を行った。また、(1) 素子のヒステリシスなどを有する電流・電圧 (IV) 特性から、製作された細線の構造・状態を予測・理解するための 1~2 次元モデルや、(2) バイアス電圧や局部発振波による励起、インピーダンス整合、細線サイズ、抵抗-温度特性、臨界温度、といった各種パラメータからゲイン特性を再現するモデルの構築を進めた。これらは HEB 素子の設計や製作プロセスの再現性の改善、動作点の最適化などに利用していく。さらに、今回あらたに TEM 撮像を実施し、HEB 素子の各層の厚みの精度や再現性、超伝導細線部/電極間に

おけるエッチング領域の断面・表面の構造や再付着の状態なども詳しく調べた。この撮像の結果をもとに、ICP 装置によるエッチングプロセスの条件・環境の見直しを進めた。この研究は大阪府立大学の前澤裕之氏との共同研究である。

<受賞>

- [1] 坂井南美、日本天文学会研究奨励賞、日本天文学会、2013 年 3 月 21 日。
- [2] 柴田大輝、Best Poster Award, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory, 2012 年 12 月 7 日。

<報文>

(原著論文)

- [3] N. Sakai, C. Ceccarelli, S. Bottinelli, T. Sakai, and S. Yamamoto, "Distribution of CH₃OH in NGC1333 IRAS4B ", *Astrophys. J.* 754, 70 (8 pp)(2012).
- [4] N. Sakai, Y. Shirley, T. Sakai, T. Hirota, Y. Watanabe, and S. Yamamoto, "Tentative Detection of Deuterated Methane toward the Low-Mass Protostar IRAS 04368+2557 in L1527 ", *Astrophys. J.* 758, L4 (4 pp) (2012).
- [5] N. Sakai, H. Maezawa, T. Sakai, K.M. Menten, and S. Yamamoto, "CH Radio Emission from Heiles Cloud 2 As a Tracer of Molecular Cloud Evolution ", *Astron. Astrophys.* 546, A103 (8 pp) (2012).
- [6] T. Yamaguchi, S. Takano, Y. Watanabe, N. Sakai, T. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, N. Hirano, S. Takakuwa, Y. Aikawa, H. Nomura, and S. Yamamoto, "The 3 mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 B1 Shocked Region. I. Data ", *Publ. Astron. Soc. Japan* 64, 105 (45 pp) (2012).

(学位論文)

- [7] 椎野竜哉、"Development of a Low Noise HEB Mixer Receiver for Spectroscopic Observations in the THz Band" (博士論文)
- [8] 相馬達也、「テラヘルツ帯超伝導 HEB ミクサ受信機の超広帯域化」(修士論文)
- [9] 徳留智矢、「太陽型原始星 L1527 における「暖かい炭素鎖化学」の探求」(修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Y. Watanabe, K. Sorai, N. Sakai, S. Yamamoto, "Spectral Line Survey toward Spiral Arm in Nearby Galaxy M51", Workshop on Interstellar Matter 2012, Sapporo, Japan, October, 2012.

- [11] Y. Watanabe, K. Sorai, N. Sakai, S. Yamamoto, "Spectral Line Survey toward GMCs in M51", Astrochemistry in the ALMA era, Copenhagen, Denmark, January, 2013.
- [12] T. Shiino, R. Furuya, T. Soma, T. Sakai, Y. Watanabe, N. Sakai, L. Jiang, O. Ohguchi, H. Maezawa, T. Yamakura, Y. Irimajiri, and S. Yamamoto, "The 0.9 and 1.3 THz Superconducting HEB Mixer Receiver for the ASTE 10 m Telescope", The 23rd International Symposium on Space Terahertz Technology, C-43, Tokyo, Japan, 4 April 2012.
- [13] T. Soma, N. Sakai, Y. Watanabe and S. Yamamoto, "Abundant CH₃OH in the Cold Starless Core TMC-1", Workshop on Interstellar Matter 2012, Sapporo, Japan, October, 2012.
- 【New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory, Hakone, Japan, December, 2012】**
- [14] Y. Watanabe, N. Sakai, J. Lindberg, J. Jorgensen, S. Bisschop, and S. Yamamoto, "The 0.8 mm Spectral Line Survey toward Low-Mass Protostellar Cores with ASTE" (P056)
- [15] T. Shiino, R. Furuya, T. Soma, T. Sakai, Y. Watanabe, N. Sakai, L. Jiang, O. Ohguchi, H. Maezawa, T. Yamakura, and S. Yamamoto, "The 0.9 and 1.3 THz Superconducting HEB Mixer Receiver for the ASTE 10 m Telescope" (P101)
- [16] T. Yamaguchi, S. Takano, N. Sakai, Y. Watanabe, S. Yamamoto, and NRO Line Survey Team Members, "The Shock Chemistry in Low-Mass Star-Forming Regions" (P040)
- [17] D. Shibata, N. Sakai, Y. Watanabe, T. Hirota, S. Yamamoto, "Deuterium Fractionation in Low-Mass Star Forming Regions" (P059)
- [18] T. Soma, N. Sakai, Y. Watanabe, S. Yamamoto, "Abundant CH₃OH in the Starless Core TMC-1" (P055)
- [19] T. Tokudome, N. Sakai, T. Sakai, S. Takano, S. Yamamoto and NRO Line Survey Team Members, "Nobeyama 45 m Telescope Legacy Project: Line Survey of L1527" (P058)
- [20] Y. Nishimura, N. Sakai, Y. Watanabe, T. Sakai, T. Hirota, S. Yamamoto, "Observations of Deuterated Species toward Low-Mass Prestellar and Protostellar Cores" (P051)
- [21] H. Inokuma, N. Sakai, H. Maezawa, K.M. Menten, and S. Yamamoto, "Statistical Equilibrium Calculations of OH: Interpretation of the 1612 MHz Absorption Line in HCL2" (P054).
- [22] S. Yamamoto, N. Sakai, and Y. Watanabe, "Chemical Diversity in Low-Mass Star Forming Regions", Astrochemistry in the ALMA era, Copenhagen, Denmark, January, 2013.
- [23] S. Yamamoto, N. Sakai, and Y. Watanabe "Chemical Diagnostics of the Early Phase of Star Formation", EPOS2012, Lingberg Castle, Germany, July, 2012.
- [24] N. Sakai, "Chemical Diversity of Low-Mass Star-Forming Cores: Class 0 to Class I", New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory, Hakone, Japan, December, 2012.

(国内会議)

一般講演

【日本天文学会 2011 年秋季年会、大分大学、2012 年 9 月】

- [25] 山口貴弘、高野秀路、坂井南美、山本智、「The Shock Chemistry of the EHV Outflow from L1448C(N)」, P119a
- [26] 柴田大輝、坂井南美、渡邊祥正、廣田朋也、山本智、「低質量原始星形成に伴う重水素濃縮度変化」, P117a
- [27] 徳留智矢、坂井南美、酒井剛、高野秀路、山本智、NRO ラインサーベイプロジェクトメンバー、「L1527 におけるスペクトル線サーベイ (3)」, P118a
- [28] 西村優里、坂井南美、渡邊祥正、酒井剛、廣田朋也、山本智、「星なしコア TMC-1、Lupus-1A における重水素濃縮度」, P301c
- [29] 猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智、「統計平衡計算による OH 分子の基底状態遷移の解析」, Q45c
- 【日本天文学会 2012 年春季年会、埼玉大学、2013 年 3 月】**
- [30] 坂井南美、Yancy Shirley、廣田朋也、酒井剛、山本智、「Tentative Detection of Deuterated Methane toward Low-Mass Protostar IRAS 04368*2557 in L1527」, P14a
- [31] 渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「Spectral Line Survey toward GMCs in M51」, R21a
- [32] 椎野竜哉、古屋隆太、相馬達也、酒井剛、渡邊祥正、坂井南美、大口脩、Jiang Ling、前澤裕之、山本智、「1.5 THz 帯拡散冷却型 NbTiN HEB ミクサの開発」
- [33] 相馬達也、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「Abundant CH₃OH in the Cold Starless Core TMC-1」, P15a
- [34] 西村優里、坂井南美、渡邊祥正、酒井剛、廣田朋也、山本智、「Systematic differences of excitation temperatures between DNC and HN¹³C」, P216a

招待講演

- [35] 山本智、椎野竜哉、相馬達也、古屋隆太、渡邊祥正、酒井剛、西村優里、坂井南美、大口脩、Jiang Ling、前澤裕之、「テラヘルツ・ヘテロダイナミクスによる星間化学」、日本応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013 年 3 月、28p-G10-4

招待講演

- [22] S. Yamamoto, N. Sakai, and Y. Watanabe, "Chemical Diversity in Low-Mass Star Forming Regions", Astrochemistry in the ALMA era, Copenhagen, Denmark, January, 2013.

II

Summary of group activities in 2012

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 an 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 CH_4 which is evaporated from ice mantles. This has recently been confirmed by our detection of CH_3D 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 the protoplanetary disks by using ALMA. The ALMA Cycle 0 result for L1527 shows that carbon-chain molecules do exist even in the closest vicinity of the protostar (~ 100 AU). Further analyses are now 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 waveguide 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 2013.

[1] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., Abundant Carbon-Chain Molecules toward the Low-Mass Protostar IRAS04368+2557 in L1527, *ApJ*, **672**, 371 (2008).

[2] 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).

[3] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., Distributions of Carbon-Chain Molecules in L1527, *ApJ*, **722**, 1633 (2010).

[4] 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).