

I

研究室別 2011年度 研究活動報告

0.0.1 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、観測的にも理論的にも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重要なテーマでもある。本研究室では、星・惑星系形成とそこでの物質進化を、電波観測（主にミリ波、サブミリ波、テラヘルツ波）により研究している。

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のである。本研究室では、このような独創的視点を軸に、星・惑星系形成過程の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 月から部分運用を開始し、2013 年から本格運用を予定している。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、 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つつある。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。

0.0.2 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。一方で、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。

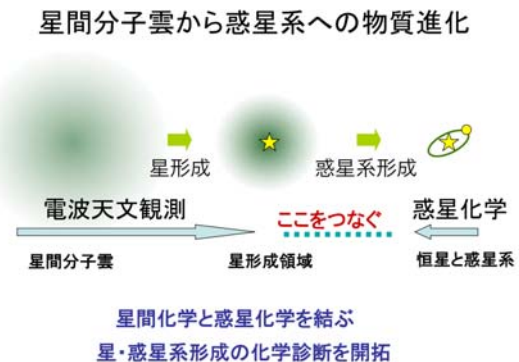


図 0.0.1: A schematic illustration of our goal

【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いる。今年度までの観測で、3 mm 帯 (80-115 GHz) のほぼすべての周波数帯域を観測した。rms 雑音温度が 5 mK (T_A^*) 以下という高感度観測の結果、40 種類以上の分子を検出できた。c- C_3H_2 の高励起線、c- C_3H の微細構造線など他の天体では見られないものも多い。HCO、CCCO、HCCCHO、CCO などの酸素を含む有機分子も多数検出されたが、 $HCOOCH_3$

や $(\text{CH}_3\text{O})_2$ などの大型飽和有機分子は検出されなかった。L1527 の分子組成を、同様に炭素鎖分子が豊富な星なしコア TMC-1 と比較したところ、窒素を含む分子が系統的に少ないなどの特徴がわかり、両者の化学過程の違いが浮き彫りになった。

【Serpens SMM4 のラインサーベイ】 ホットコリノ天体ごとの分子組成の違いを調べる目的で、我々は ASTE 10 m 望遠鏡を用いた 345 GHz 帯のラインサーベイ観測を推進している。昨年度の R CrA IRS7B に引き続き、本年度は別のホットコリノ天体候補である Serpens SMM4 を観測した。332-364 GHz の周波数範囲を r.m.s 雑音温度 11-40 mK で高感度観測し、12 種の分子と 8 種の同位体分子を検出した。分子組成は、R CrA IRS7B と異なり、典型的なホットコリノ天体の IRAS 16293-2422 に近いことがわかった。この天体では NH_2D が検出され、 DCO^+ も比較的強く観測されたが、 HDCO や DCN の重水素濃縮度は IRAS 16293-2422 よりも低かった。距離がより遠い Serpens SMM4 ではエンベロープの影響をより強く受けているためと見られる。

【NGC2264 CMM3 のラインサーベイ】 NGC2264 CMM3 は、遠赤外線でも原始星が見えないほど若い大質量星形成領域である。我々はこの天体に対して、ASTE 10 m 望遠鏡及び野辺山 45 m 望遠鏡を用いてラインサーベイ観測を行った。ASTE では 330-366 GHz の範囲を観測し、16 種の分子と 14 種の同位体分子を検出した。野辺山 45 m 望遠鏡では、84.8-94.6GHz 及び 96.8GHz-106.6GHz の範囲を観測し、ASTE で検出された基本分子に加え、 C_4H 、 HC_3N 、 HC_5N などの炭素鎖分子を検出した。本サーベイでは上位準位エネルギー ($E_{\text{r.m.u.}}$) が 300 K を越える CH_3OH の超高励起輝線も検出した。これらは大質量原始星に付随していると考えられ、原始星近傍の運動や化学過程を知る手がかりとなると期待される。

【L1157 B1 衝撃波領域のラインサーベイ】 衝撃波は、星形成領域、銀河中心、超新星など、星間空間で普遍的に見られる。我々は、衝撃波に伴う化学過程を解明するために、低質量原始星 IRAS 20386+6751 周辺の衝撃波領域、L1157 B1 に対して、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 78.1-115.8 GHz の周波数帯でのラインサーベイ観測を行った。この衝撃波領域は原始星からの双極分子流が周辺ガスと衝突して生じており、原始星から 0.1 pc ほど離れているため、純粋な衝撃波現象が観測できる。観測の結果、29 種類の分子の 130 本のスペクトル線を検出し、衝撃波領域の分子組成の全貌を明らかにすることができた。このサーベイにより、大型飽和有機分子である CH_3CHO 、 HCOOH_3 、 NH_2CHO 、リンを含む分子である PN、炭素鎖分子の CCS などが検出された。本観測のスペクトルデータは、論文として投稿し受理されている。今後、他の関連領域の分子組成や衝撃波化学モデルとの比較を進める予定である。

【低質量原始星 L1448 のラインサーベイ】 衝撃波領域の分子組成をさらに詳しく調べるため、ペルセウス座にある低質量原始星 L1448 mm 周辺の衝撃

波領域 L1448 B1/R1 に対して、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 79-155.8 GHz 帯のラインサーベイ観測を行った。L1448 B1/R1 は原始星からの離角がそれぞれ $10''$ 程度なので、原始星方向を観測することで望遠鏡のビームサイズ ($\sim 20''$) 内に含まれる。この領域の特徴は、ジェットの高速度が 80 km s^{-1} に達し、L1157 B1 の 4 倍もあることである。L1448 B1/R1 におけるラインサーベイでは、L1157 B1 で観測された HCOOH 、 HCOOCH_3 、 CH_3CHO 等の有機分子は検出されていない。これは、L1157 B1 と L1448 B1/R1 での星間塵組成の違いや、双極分子流の年齢の違いなどを反映していると考えられる。同時に観測した原始星方向からは、 C_4H や CH_3CCH などの炭素鎖分子が検出されており、低質量星形成領域の分子組成としても興味を持たれる。

【NGC1333 における PN の検出】 我々は、衝撃波領域 L1157 B1 においてリンを含む分子 PN を検出した。これは低質量星形成領域としては初検出であるとともに、リンの化学が衝撃波化学と関連していることを示す結果であった。この結果を進展させるため、低質量星形成領域 NGC 1333 IRAS 4 近傍の衝撃波領域において PN ($J = 2 - 1$) の観測を行った。その結果、PN 輝線を 6σ 程度の強度で検出した。検出された PN 輝線は、ピーク速度が分子雲の視線速度とほぼ一致しており、速度幅は 1.5 km s^{-1} 程度であった。これは、衝撃波領域に存在している速度幅の広い SiO ($J = 2 - 1$) のスペクトルとは明らかに異なる。Charnley and Millar (1994) によれば、PN は星間塵上に存在する PH_3 が蒸発した後、気相反応で 10^4 yr 程度の時間をかけて生成される。このように、生成に一定時間を要することから、NGC 1333 IRAS 4 で観測された PN の起源は、線幅の広い SiO スペクトルの原因である現在の衝撃波ではなく、線幅の細い SiO スペクトルを生じさせている過去の減速した衝撃波に由来する可能性が高い。

【70 GHz 帯での D 化物の観測】 低質量原始星近傍の分子組成は、同じような原始星進化段階にあっても同じとは限らない。これまでの観測で、少なくともホットコリノ化学と WCCC の 2 種類の化学過程があり得ることがわかっている。我々は、星形成までの時間が長い場合にホットコリノとなり、短い場合に WCCC 天体となることを提案している。これを確かめるために、分子の重水素濃縮度に着目した。重水素濃縮度は、星形成までの時間が長いほど高くなるため、独立な検証ができる。その観測のために、基本的分子の重水素化物のスペクトル線が多数存在する 70 GHz 帯の高感度受信機を開発し、野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載した。この受信機を用いて、WCCC 天体である L1527、IRAS15398-3359、ホットコリノ天体である IRAS 16293-2422、および関連する星なしコア (星形成が起こる前の分子雲コア) に対して、 DCO^+ 、 N_2D^+ 、 DCN 、 CCD などの観測を行った。現在、その詳細な解析が進行中である。

【星形成に伴う重水素濃縮の変化】 原始星誕生に伴う分子の重水素濃縮度の変化を確立する目的で、低

質量星形成領域 L1551、IRAS16293-2422 に対して重水素濃縮度分布を野辺山 45 m 望遠鏡で調べた。L1551 では原始星方向で DCO^+ の重水素濃縮度が減少しているのに対して、中性分子 DNC の重水素濃縮度は周辺と差がないことがわかった。これは、中性分子は分子イオンよりも解消速度が遅いためと考えられる。一方、同じ分子イオンでも N_2D^+ では原始星方向での重水素濃縮度の減少が見られず、また、IRAS16293-2422 では DCO^+ についても減少を見ることができなかった。これは、原始星周囲の低温のエンベロープの影響を受けているためであり、こ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重要であることがわかった。

【TMC-1 における $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ 】星間分子雲において、一般に $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は 60 であると考えられてきたが、我々の研究により、星なしコアにおいては分子によってこの比が大きく異なることがわかってきた。CO 分子から生成される分子では 60 に近い値を示すが、 C^+ から生成される分子ではそれより高い値を示す傾向がある。このことを利用して、 CH_3OH の生成過程を調べた。IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いて、星なしコア TMC-1(CP) において CH_3OH の ^{13}C 同位体種 $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ の観測を行ったところ、 CH_3OH の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比はほぼ 60 であることがわかり、CO 分子由来である可能性が高いことが示された。冷たい星なしコアでの CH_3OH の生成過程については、(1) 気相中で C^+ から生成する機構と、(2) 星間塵の表層で CO 分子の水素化によって生成し、何らかの理由で気相中に放出される機構が考えられている。本研究の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比の結果は (2) を支持する。

【星なしコアの CH_3OH の起源】 CH_3OH は星形成領域で観測される代表的な分子で、星間塵表面上で生成されたものが星形成活動に伴い気相に放出されると考えられている。一方、 CH_3OH は TMC-1 のような 10 K 程度の冷たい星なしコアでも検出され、上で述べた ^{13}C 同位体の観測から星間塵起源と考えられる。そこで、10 K の環境でどのようにして CH_3OH (蒸発温度 ~ 100 K) が蒸発してくるかが問題となっていた。我々は、GBT 100 m 望遠鏡、IRAM 30 m 望遠鏡による高周波数分解能観測で、TMC-1 における CH_3OH スペクトル線プロファイルが他の分子と大きく異なることを見出した。 CH_3OH は小さな空間スケールで強度が変化しており、また、速度的にはエンベロープとの中間に存在するように見える。コア内部での乱流やエンベロープガスのコアへの降着などで生じる衝撃波で、 CH_3OH が星間塵表面から蒸発している可能性がある。

【気相での CO_2 生成】 CO_2 は惑星大気や彗星などの主要な構成分子の一つであり、星間化学と惑星科学をつなぐ重要な分子である。赤外線観測で固体 CO_2 が広く観測されてきたため、この分子は星間塵の表面で生成されると考えられてきた。一方で、気相の CO_2 については、 CO_2 が電波領域に回転遷移スペクトル線を出さないため、観測は非常に限られてきた。我々は気相中の CO_2 を定量するのに HCO_2^+ が有効であることに着目し、IRAM 30 m 望遠鏡で観測を

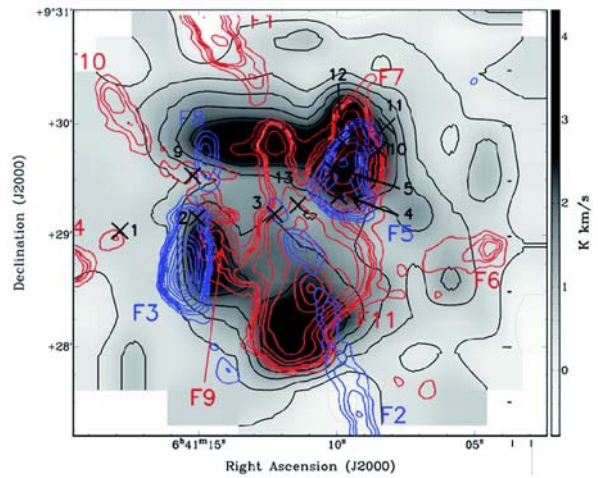


図 0.0.2: Integrated intensity map of SiO in NGC2264 CMM3 superposed on the distribution of outflows.

行った。 HCO_2^+ は星なしコア (TMC-1、L1544) でも検出され、気相で CO_2 生成が起こっていることが示唆された。気相生成には HCO と酸素原子の反応が重要な役割を果たすと考えられている。事実、これまでの観測で、3 つの低質量 Class 0 天体と 2 つの星なしコアで HCO と HCO_2^+ がともに検出され、それらの関係性が示されつつある。

【NGC 2264 における SiO の分布】我々は、衝撃波トレーサーとして知られる SiO 分子輝線で、大質量星形成領域 NGC 2264 のマッピング観測を野辺山 45 m 望遠鏡を用いて行った。その結果、SiO が大質量原始星 CMM 3 を中心としてシェル状の構造をしていることがわかった (図 0.0.2)。SiO の分布はこの領域の分子流の分布と大局的に似ているが、分子流が比較的弱いにもかかわらず SiO が卓越して多い領域も存在している。これは、現在は見えていない「過去の分子流」によって気相中に放出された SiO が生き残っているためと考えられる。NGC 2264 の SiO のスペクトルは、線幅 20 km/s 程度のブロードな成分と 5 km/s 程度のシャープな成分が存在しており、後者は領域全体に広く分布している。このシャープな成分も、やはり過去にダストから放出された SiO が減速されたものと考えられる。そのような古い衝撃波の痕跡が領域全体に存在することは、NGC 2264 において 10^5 年以上にわたって、分子流により乱流が継続的にクランプに供給されてきたことを示唆する。

0.0.3 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以外の様々な分子を容易に検出することが期待され、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のラインサーベイ】これまで活動銀河核や爆発的星形成領域といった極限的な環境下の分子ガスを除き、GMCスケールの化学組成を研究した例はほとんどない。そこで、我々は典型的な円盤銀河であるM51の渦状腕に対してIRAM 30m望遠鏡及び野辺山45m望遠鏡を用いてラインサーベイを実施した。85-116 GHz及び130-148 GHz帯を観測した結果、CCH、HNCO、CH₃OH、N₂H⁺、H₂COなど、これまで系外銀河の渦状腕では検出例のなかった分子を数多く検出した(図0.0.3)。本研究により、渦状腕上のGMCの化学組成をくまなく明らかにし、GMC進化に化学進化を適用する際に着目すべき分子を同定できた意義は大きい。今後はALMAを使った高空間分解能観測により、化学組成とGMC進化の関連を明らかにしていく。

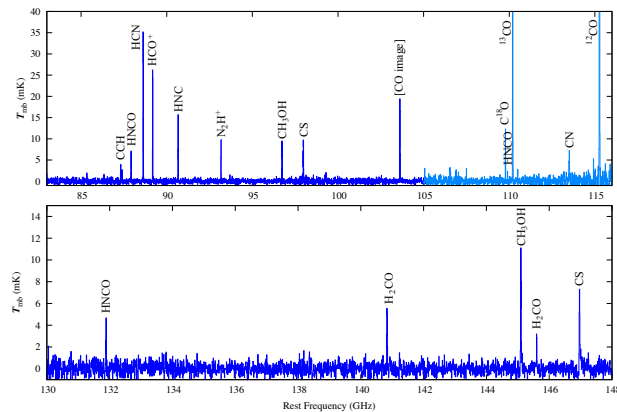


図 0.0.3: Spectral line survey toward M51

0.0.4 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)の2つがある。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。

【世界一低雑音のHEBミキサ】ASTE望遠鏡でのTHz帯観測のために、NbTiNを超伝導物質に用いた0.9 THz帯、1.5 THz帯の導波管型HEBミキサ素子の開発を進めた。我々は、昨年度すでに、0.9 THz帯で450 K、1.5 THz帯で590 Kという低雑音温度を示すHEBミキサの製作に成功していた。今年度は、雑音温度をそれぞれ380 K、490 Kまで低下させた。これは量子雑音の約10倍、7倍に相当し、1.5 THz帯ミキサは世界で最も高感度なHEBミキサ素子である。このような低雑音を実現できた最も大きな要因は、超伝導マイクロブリッジの短縮である。NbTiNでは、超伝導の破壊で生じた熱電子を冷却する機構は格子冷却である。しかし、我々は格子冷却と同時に、伝導で電極の金属に電子を逃がす拡散冷却もある程度有効に働いていることに注目し、拡散をより有効に働かせるためにブリッジの長さを0.1 μmまで短くした。その結果、電子の冷却がよりスムーズになり、雑音の低下につながったと考えられる。

【加熱成膜を取入れたHEBミキサの製作】HEBミキサの中間周波数帯域を拡大することは、同時観測帯域を広げる点で重要である。そのためには、3 nm程度の厚さで良好な超伝導特性を示す超伝導薄膜が必要であり、これを実現するために、スパッタ成膜中に基板を400 °C程度まで加熱する基板加熱法を導入した。まずガラス基板を用いてNbTiN薄膜でその効果を調べたところ、厚さ8 nmの膜で4 K以上の超伝導転移温度(T_c)の上昇がみられた。そこで、これまでの製作プロセスを一部見直し、基板加熱とAlN緩衝層を組み込んだ新たなプロセスを考案し、3 nmの膜厚の超伝導層を持つHEBミキサを製作した。その雑音温度は、1.1 GHz帯で490 Kと、これまでの10.8 nmの素子と遜色ない性能が得られた。中間周波数帯域の測定を行ったところ、10.8 nmの素子では1.1 GHzだった帯域幅が、3 nmの素子では2.1 GHzまで拡大した。このように、基板加熱がHEBミキサの製作で有効であることが確認された。

【ASTE用THz受信機の製作】我々の開発したHEBミキサをASTE望遠鏡に搭載するため、ASTE望遠鏡に適合するカートリッジ型受信機を組み上げた。周波数帯は0.9/1.3-1.5 THz帯のデュアルバンドで、各

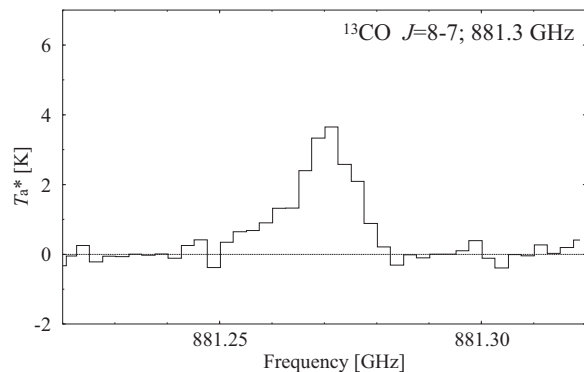


図 0.0.4: The ^{13}CO line observed toward the Orion A cloud with ASTE

周波数同時受信が可能である。0.9 THz 帯では既存の電波天文学に用いられてきた SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミクサを使った観測が可能であるが、我々の製作した HEB ミクサの動作実証のため、両バンドとも HEB ミクサを用いた。この受信機カートリッジを ASTE 望遠鏡仕様のデューワで試験し、研究段階と同等の性能で正常に動作していることを確認した。

【ASTE 用 IF システムの製作】 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は 0.9-1.4 GHz 帯に出力される。しかし、ASTE 望遠鏡に備わっている伝送系統は 6 GHz 帯用なので、出力信号を 1.1 GHz 帯から 6 GHz 帯に周波数変換する必要がある。そのためのモジュールを、市販のアップコンバータを用いて設計・作成した。入出力レベルの調整、周波数変換後のフラットな特性、および高地での運用にあたっての発熱対策の 3 点に留意して製作したものを、実験室で評価したうえで、ASTE 望遠鏡に取り付け試験運用に用いた。

【ASTE 望遠鏡での THz 帯試験観測】 2011 年 9 月末から 10 月頭の 2 週間程度、チリの標高 5000 m のアタカマ砂漠にある ASTE 10 m 望遠鏡に搭載して試験観測を行った。今回は搭載期間が非常に限られている上、初めての搭載で試験観測が目的なので、0.9、1.3 THz のみ搭載した。我々の製作した HEB ミクサ受信機は望遠鏡サイトでも良好に動作し、0.9 THz 帯で月、木星の連続波観測およびオリオン A 分子雲中の ^{13}CO の回転スペクトル ($J = 8 - 7$; 881.3 GHz) の検出に成功した (図 0.0.4)。これにより、2012 年度以降本格的なテラヘルツ帯科学観測を行う目処がついた。

【準光学型 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 NbTiN HEB ミクサ素子の開発を行った。本年は、1.9THz 帯の通倍型固体発振器を 2 台利用し、これらを入力信号と局部発振信号として HEB ミクサ (細線厚 5nm、長

さ 150 nm) に入力し、0.8-1.8 GHz 帯において中間周波信号 (IF) を得ることに成功した。さらに IF を 1 GHz 帯域 (中心 0.5GHz) のデジタルフーリエ分光計へと導き、ヘテロダイン分光システムを構築した。現在、HEB ミクサの雑音評価を進めている。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。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Sakai, N. Sakai, K. Furuya, Y. Aikawa, T. Hirota, and S. Yamamoto, " DNC/HNC Ratio of Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-Mass Star Formation ", *Astrophys. J.*, **747**, 140 (10 p) (2012).
- [2] Y. Watanabe, N. Sakai, J.E. Lindberg, J.K. Jorgensen, S.E. Bisschop, and S. Yamamoto, " An Unbiased Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE ", *Astrophys. J.* **745**, 126 (23 pp) (2012).
- [3] S. Shiba, Y. Irimajiri, T. Yamakura, H. Maezawa, N. Sekine, I. Hosako, and S. Yamamoto, " 3.1 THz Heterodyne Receiver Using an NbTiN Hot-Electron Bolometer Mixer and a Quantum Cascade Laser ", *IEEE Tran. Terahertz Sci. Tech.* **2**, 22-28 (2012).
- [4] 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, " Detection of Phosphorous Nitride in the Lynds 1157 B1 Shocked Region ", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **63**, L37-L41 (2011).
- [5] T. Hirota, T. Sakai, N. Sakai, and S. Yamamoto, " Detection of Two Carbon-Chain-Rich Cores: CB130-3 and L673-SMM4 ", *Astrophys. J.* **736**, 4 (8 pp) (2011).
- [6] M. Sugimura, T. Yamaguchi, T. Sakai, T. Umemoto, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, T.J. Millar, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto, " Early Results of the 3 mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 Shocked Region ", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **63**, 459-472 (2011).
- [7] O. Saruwatari, N. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, T. Sakai, and S. Yamamoto, " Compact Molecular Outflow from NGC2264 CMM3: A Candidate for Very Young High-Mass Protostar ", *Astrophys. J.*, **729**, 147 (7 pp) (2011).

(会議抄録)

- [8] " Observations of Complex Molecules in Low-Mass Protostars ", N. Sakai and S. Yamamoto, " The Molecular Universe ", J. Cernicharo and R. Bachiller eds., *Proceedings IAU Symposium No. 280*, 43-52 (2011).

- [9] “ Peculiar Carbon-Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Regions ”, N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, “ Condition and Impact of Star Formation ”, M. Rolling, R. Simon, V. Ossenkopf, and J. Stutzki eds., EAS Publication Series, **52**, 235-238 (2011).
- [10] “ Line Survey of L1157 B1 Shocked Region ”, T. Yamaguchi, M. Sugimura, T. Sakai, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto, *ibid* **52**, 311-312 (2011).

(国内雑誌)

- [11] 鶴澤佳徳、山本智、「テラヘルツ天文学を切り拓く受信機技術」、日本物理学会誌、**66**、375-379 (2011).
- [12] 坂井南美、「化学の目でみた星形成：星形成の多様性」、日本惑星学会誌、**20**、52-60 (2011).

(学位論文)

- [13] 柴田大輝、「低質量成形性に伴う重水素濃縮度変化の観測的研究」、修士論文、2012年3月
- [14] 古屋隆太、「テラヘルツ領域での天体観測を目指した超伝導 HEB ミクサの製作と基板加熱機構の導入」、修士論文、2012年3月

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [15] Y. Watanabe, N. Sakai, J. Lindberg, J. Jorgensen, S. Bisschop, and S. Yamamoto, “ Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE ”, Molecular Universe, IAU Symposium No 280, Toledo, Spain, May 2011.
- [16] T. Shiino, L. Jiang, R. Furuya, T. Yamaguchi, S. Shiba, T. Sakai, N. Sakai, Y. Watanabe, O. Ohguchi, H. Maezawa, T. Yamakura, Y. Irimajiri, S. Yamamoto, “ Development of the 1.3-1.5 THz Band Superconducting HEB Mixer Receivers for ASTE 10 m Telescope ”, The 22nd International Symposium on Space Terahertz Technology, 10-1, Tucson, U.S.A. April 2011.

招待講演

- [17] S. Yamamoto and N. Sakai, “ ^{13}C Isotope Fractionation in Cold Molecular Clouds ”, Isotopes in Astrochemistry: An Interstellar Heritage for Solar System Materials?, Leiden, Netherland, December 2011.
- [18] “ N. Sakai, Observations of Complex Molecules in Low-Mass Protostars ”, IAU Symposium No. 280, Toledo, Spain, May 2011.

(国内会議)

一般講演

【日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学、2011 年 9 月】

- [19] 坂井南美、酒井剛、廣田朋也、山本智、「低質量星形成領域 L1527 における炭素鎖分子の高分解能観測」、P40a
- [20] Y. Watanabe, N. Sakai, J. Lindberg, J. Jorgensen, S. Bisschop, S. Yamamoto, 「Spectral Line Survey of R CrA IRS7B with ASTE II」、P42c
- [21] 椎野竜哉、古屋隆太、相馬達也、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、大口脩、前澤裕之、山倉鉄矢、Jiang Ling、入交芳久、山本智、「ASTE 望遠鏡での 0.9, 1.3-1.5 THz 帯分光観測へ向けた受信機 開発 (1)」、V47c
- [22] 山口貴弘、高野秀路、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、山本智、他ラインサーベイメンバー、「Line Survey of L1157 B1 Shocked Region」、Q17a
- [23] 柴田大輝、坂井南美、廣田朋也、酒井剛、山本智、「原始星形成による重水素濃縮の解消」、P41a
- [24] 相馬達也、椎野竜哉、古屋隆太、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、大口脩、前澤裕之、山倉鉄矢、Ling Jiang、入交芳久、山本智、「ASTE 望遠鏡での 0.9, 1.3-1.5 THz 帯分光観測へ向けた受信機開発 (2)」、V48c
- [25] 古屋隆太、渡邊祥正、坂井南美、酒井剛、山本智、「大質量星形成領域 NGC2264 CMM3 のマッピング観測」、P43c
- [26] 徳留智矢、坂井南美、酒井剛、高野秀路、山本智、他ラインサーベイメンバー、「L1527 におけるスペクトル線サーベイ (2)」、P48b

【日本天文学会 2012 年春季年会、龍谷大学、2012 年 3 月】

- [27] 坂井南美、前澤裕之、酒井剛、Karl Menten、山本智、「Distribution of 9 cm CH Emission in Heiles Cloud 2」、P109a
- [28] 渡邊祥正、坂井南美、徂徠和夫、山本智、「Spectral Line Survey toward GMCs in M51 with NRO 45 m telescope」、R27a
- [29] 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、山倉鉄矢、入交芳久、山本智、「ASTE 望遠鏡への 0.9, 1.3 THz 帯超伝導 HEB ミクサ受信機搭載」、V144a
- [30] 山口貴弘、高野秀路、酒井剛、坂井南美、渡邊祥正、山本智、他ラインサーベイメンバー、「Line Survey of L1157 B1 Shocked Region II」、P110a
- [31] 相馬達也、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「星なし分子雲コアにおける豊富な CH_3OH の起源」、P107a
- [32] 古屋隆太、渡邊祥正、坂井南美、酒井剛、山本智、「NGC2264 CMM 3 で見られるクランプへの継続的な乱流供給」、P103a
- [33] 古屋隆太、椎野竜哉、相馬達也、大口脩、前澤裕之、坂井南美、山本智、「広帯域化に向けた超伝導 HEB ミクサの改良と性能評価」、V115b
- [34] 徳留智矢、坂井南美、酒井剛、渡邊祥正、山本智、「Gas-phase Production of CO_2 in Dark Cloud Cores」、P108a

II

Summary of group activities in 2011

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 Nami Sakai

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.

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 2012.

[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] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case, *ApJ*, **702**, 1025 (2009).

[3] 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).

[4] M. Sugimura, T. Yamaguchi, T. Sakai, T. Umemoto, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, T.J. Millar, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto, Early Results of the 3 mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 Shocked Region, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **63**, 459-472 (2011).