

I

研究室別 2013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。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 などの先端的観測装置を用いて幅広い研究を進めている。

星間分子雲から惑星系への物質進化

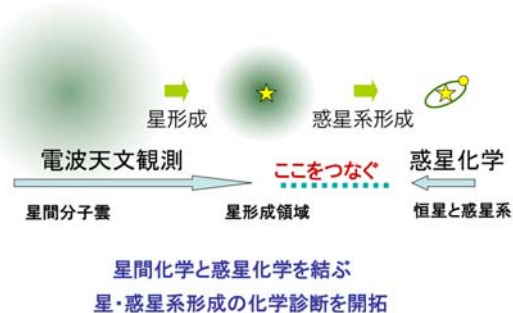


図 0.1.1: A schematic illustration of our goal

【原始惑星系円盤外縁部で劇的な化学変化】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、惑星系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 の位置よりも内側で、炭素鎖分子やその仲間の分子が急激にガス中からなくなってしまうことを見出した。ドップラー効果の精密な測定から、100 AU という

半径は、落ち込んでくるガスが遠心力のために滞留し（遠心力バリア）、惑星系円盤に移り変わっていく半径であることがわかった（図2, 3）。即ち、惑星系円盤形成の「最前線」を同定したといえる。一方、SO分子の分布を調べたところ、この分子は遠心力バリア付近でリング状に局在していることがわかった。SO分子の温度が落ち込んでくるガスの温度に比べて高いことから、落ち込むガスが遠心力バリアに突っ込むときに、弱いながらも衝撃波が生じていると考えられる。その結果、ガス中に含まれる塵（星間塵）の表層に凍りついていたSO分子がガス中に放出され、リングのように観測されたと見られる。惑星系円盤内では密度が非常に高いので、遠心力バリアを通過した後はほとんどの分子が星間塵に凍りついてしまう。円盤形成に伴って激しい化学変化がおこることは予想すらされていなかったため、惑星系の物質的起源の研究に大きなインパクトを与えた。また、惑星系円盤が周囲のガスから形成される過程の理解は、太陽系の起源の理解にもつながる重要な研究課題であるが、これまで行われてきた、直接、構造や運動を調べる物理的アプローチでは、惑星系円盤と周囲のガスとの区別が難しかった。これに対し、本研究では、構造変化に伴う化学変化に着目したことで、円盤との境界を捉えることに成功した。このような観測はALMAによって初めて可能になったものであり、今後さらなる発展が期待される。

L1527の速度場の詳細解析のため、計算機シミュレーションを行った。モデルとして、回転しながら落下するガス円盤を採用した（図3）。このモデルでは、エネルギーと角運動量の保存則のため、粒子は遠心力バリアより内側には落ち込むことができない。ガスの速度場は、遠心力バリアまでの落下を粒子の運動で近似した。この運動は、中心星の質量と遠心力バリアの位置によって決定される。また、ガスの分布は中心星からの距離の1.5乗に反比例するものとし、放射強度の計算は光学的に薄い状態を仮定した。スペクトル線の熱的拡がりや望遠鏡の解像度の効果も取り入れた。このモデルは、ガスの圧力や自己吸収などを無視し単純化したものであるが、図2の観測結果をよく再現している。

【低質量原始星 IRAS15398-3359 の高分解能観測】
IRAS 15398-3359 は、おおかみ座にある Class 0 天体であり、L1527 に次ぐ WCCC 天体として知られている。今回、ALMA の初期運用 Cycle 0 の観測において、 H_2CO 、 CCH 、 $\text{c-C}_3\text{H}_2$ 、 CH_3OH などの分子が検出され、中心の原始星から北東-南西方向に噴き出すアウトフローの存在が確認された。このアウトフローにおけるガスの速度場の解析から、視線方向に対する天体の傾き角は 20° と推定された。この角度はこれまで 75° と報告されており、face-on であると考えられていたが、今観測によりむしろ edge-on に近いことがわかった。一方、原始星近傍の構造については、今観測の分解能では L1527 のような遠心力バリアは確認されなかった。また edge-on であるにも関わらず、ガスの視線速度の幅は $\pm 1 \text{ km s}^{-1}$ と小さいことがわかった。これらは、この天体では L1527 に比べてガスの比角運動量が小さく、また原始星の質量が低いことを示唆する。実際、L1527 と同じモデルを用いた解析により、原始星の質量は $0.04 M_\odot$ 。

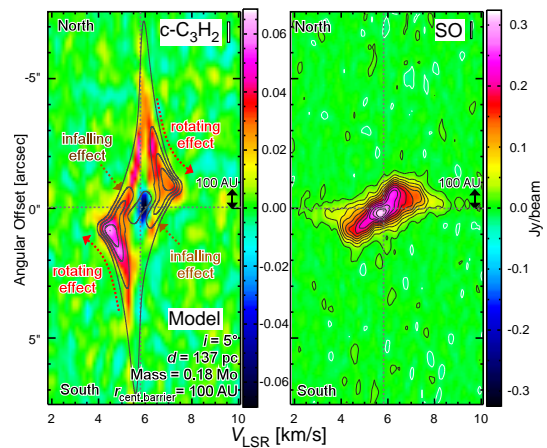


図 0.1.2: Position-velocity diagrams of $\text{c-C}_3\text{H}_2$ and SO observed toward L1527. Contours in the left panel represent the model simulation.

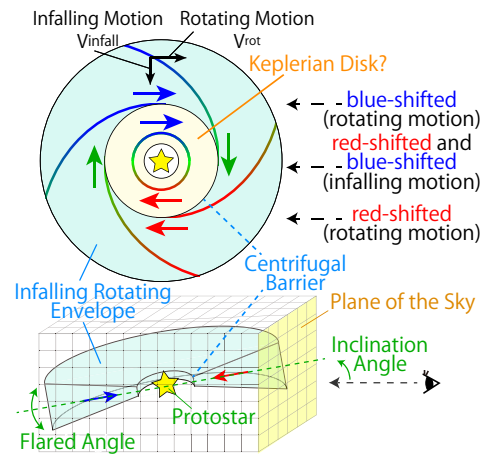


図 0.1.3: A model of an infalling rotating envelope

下と見積もられた。しかし、原始星の位置では H_2CO の高速度成分が確認されており、遠心力バリア内でケプラー回転するガス円盤の存在が示唆される。以上から、この天体は進化初期の低質量な段階にあるが、既に円盤構造を形成している可能性がある。

【TMC-1 における有機分子の起源】 星間空間で検出される分子の中にはかなり複雑な飽和有機分子 (CH_3CHO , HCOOCH_3 , CH_3OCH_3 など) も含まれている。それらは、主に原始星近傍の温かい領域で検出され、星間塵上で生成したものが星形成に伴う温度上昇で蒸発してきたものと考えられている。しかし、近年の観測研究で、複雑な飽和有機分子は冷たい星なしコアの時代から既に存在していることが明らかになってきた。それらの生成過程を調べるため、化学組成がよく知られている星なしコアである TMC-1 について野辺山 45 m 望遠鏡などで観測を行った。こ

の天体では、気相反応によって生成する炭素鎖分子 C_3S と、星間塵上でのみ生成される CH_3OH のそれぞれのラインプロファイルが大きく異なる。このことを利用し、個々の分子のラインプロファイルを上記の2つのものと比較することで生成過程を調べた。その結果、分子種によって星間塵由来、気相反応由来、その両方に由来するものがあることがわかってきた。これまで気相における飽和有機分子の生成はあまり議論されてこなかったが、その寄与を再考する必要がある。

【 ^{13}C 同位体種の異常存在量比率】米国国立電波天文台の望遠鏡 GBT を用いて、 C_3S 分子と C_4H 分子の ^{13}C 同位体種のスペクトル線を観測し、 $^{12}C/^{13}C$ 比率を求めた。その際、 $CC^{13}CS$ のスペクトル線の周波数は不明であったため、FTMW 分光計を用いて分光測定を行い、その回転遷移スペクトル線の周波数を調べた。おうし座分子雲 TMC-1 を観測したところ、3つ(あるいは4つ)の同位体種間で $^{12}C/^{13}C$ 比率が異なることが明らかになった。このことから、それぞれの分子が星間分子雲中で生成される反応において、分子中の3つ(あるいは4つ)の炭素が非等価であることを示し、その生成過程を絞り込むことができた。また、 $^{12}C/^{13}C$ 比率が通常知られている60より有意に高いこともわかった。他の様々な分子での $^{12}C/^{13}C$ 比率の値を比較することにより、CO 分子経路ではなく C^+ を起源として分子が生成されると比率が高くなることを示した。これにより、 $^{12}C/^{13}C$ 比の測定が分子の生成過程を調べる手段として非常に有効であることがわかった。

【重水素化分子の精密観測】低温の星間分子雲において、重水素化分子の通常分子に対する存在比(重水素濃縮度)は分子雲の進化とともに高まるため、進化段階の指標として用いられている。太陽系近傍にある代表的な分子雲中で、重水素濃縮度を正確に求めておくことは、今後の分子雲研究の基礎となる。このような観点から、おうし座の L1527、TMC-1、おおかみ座の IRAS15398-3359、Lupus-1A、へびつかい座の IRAS16293-2422 に対し、分子雲中で基本的な分子である HCN、HNC と、その重水素化合物 DCN、DNC の基本遷移の観測を行った。高い速度分解能で観測したことで、各スペクトル線の超微細構造を分解して観測することができた。この超微細構造を利用し各分子の励起温度を求めたところ、どの天体でも系統的に DNC の励起温度が他の分子よりも高いことがわかった。これを検証するため、Large Velocity Gradient 法による分子励起計算を行ったところ、上記の結果を説明するには DNC の空間分布が他の分子よりもコアの中心に集中している必要があることが示された。重水素濃縮度の正確な評価にはこのことを考慮する必要がある。

【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。観測の結果、L1551 IRS5 に対しては DCO^+/HCO^+ 比がディスク方向で減少

していた。一方で、DNC/HNC 比も同様に減少していた。L1551 IRS5 の年齢は $(3 - 10) \times 10^4$ 年であるため、イオン種の重水素濃縮だけでなく、中性分子の重水素濃縮度も下がっていると考えられる。一方、L1551 IRS5 (Class I) よりも進化段階の若い原始星、IRAS16293-2422 (Class 0) に対しては、イオン種、中性分子ともに原始星方向での重水素濃縮の減少は見られなかった。これは、原始星周囲の低温のエンベロープの影響が卓越しているためであり、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と考えられる。

【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いで太陽系に近い大質量星形成領域である。その中で最も重い CMM3 は、最終的に $8M_{\odot}$ の主系列星に進化すると予測されており、力学年齢が 140-2000 年の分子流が付随する非常に若い段階の原始星である。これまで我々は CMM3 に対して ASTE 望遠鏡を用いて 330-366 GHz の分子輝線サーベイを実施し、典型的な Hot Core 天体である Orion KL とは違う化学組成を持つことを明らかにしてきた。2013 年度は、国立天文台野辺山 45 m 鏡を用いて、68.0-98.6 GHz 及び 104.4-110.6 GHz のサーベイを実施した(図4)。観測の結果、 DCO^+ 、DCN、DNC、 NH_2D などの重水素化合物に加え、 C_4H 、 HC_5N 、 C_3S などの炭素鎖分子の輝線を数多く検出した。炭素鎖分子は、分子雲中の化学進化の初期段階で豊富に存在する分子であるので、CMM3 が大質量星形成の初期段階にあることを化学組成の観点からも示す結果である。

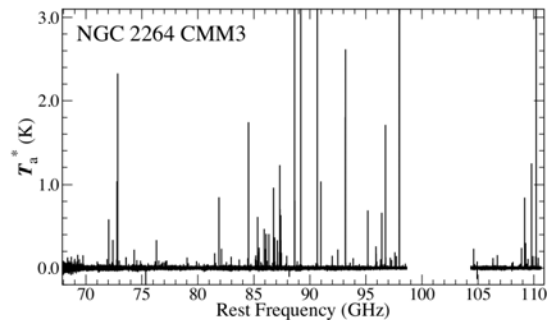


図 0.1.4: The 3 mm Band Spectrum of NGC2264

【超新星残骸 IC443 のラインサーベイ】IC 443 はふたご座にある超新星残骸であり、太陽系から 1.5 kpc の距離にある。年齢は 3×10^4 年とである。本研究では超新星残骸の高密度クランプである GI 領域について、国立天文台 45 m 電波望遠鏡を用いて 78-116 GHz 帯でのスペクトル線サーベイを行った。その結果、14 種類の分子の 44 本のスペクトル線を検出した。CS、HCN、SO、SiO などの基本的分子の他に、この領域で初めて CH_3OH および HC_3N を検出した。 CH_3OH の強度は星形成に伴う分子流で生じた衝撃波領域 L1157B1 と比べて非常に弱く、また CH_3OH 以外の飽和有機分子も検出されなかった。このことは、衝撃波発生以前のこの領域の分子雲が比較的低密度の環境にあり、星間塵マントル上での飽

和有機分子生成があまり進行しなかったためと考えられる。

【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 系外銀河の化学組成

系外銀河における化学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、中心核活動性と化学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の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 程度を超える系の化学組成を議論する場合、力学進化のタイムスケールに比べて化学進化のタイムスケールが短くなり、系内の分子雲コアで議論されてきた化学進化の概念は成立しない。そのため、活動銀河核などを伴わない通常の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再考することが、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、本研究室では近傍の円盤銀河や大マゼラン雲に存在する中心核活動性の影響を受けていない分子雲に対して、10 pc–1 kpc スケールの化学組成の観測研究を推進している。

【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 45m 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 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様々な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 (Large Magellanic Cloud: LMC) は、太陽系の最も近く (48.5 kpc) にある系外銀河であり、重元素量が太陽系近傍の 1/2–1/3 程度であることが知られている。この LMC にある分子雲を対象に、我々は 2013 年 6 月から 10 月にかけて、Mopra 22 m 望遠鏡を用いて 85–116 GHz のラインサーベイを行った。観測対象には、赤外線衛星「あかり」のサーベイ結果をもとに、大質量星形成領域が付随している分子雲と付随していない分子雲の中から HCO⁺, HCN の強度が最も強い天体である ST2 と CO Peak 1 をそれぞれ選んだ。さらに HII 領域まとった活発な大質量星形成領域 N113 を比較のために観測した。雑音温度が 8mK 程度の高感度観測を行い、3 つの天体において、CO, ¹³CO CS, HCO⁺, SO, HCN, HNC の 7 本の輝線、星形成を伴う ST2 ではさらに、CCH, c-C₃H₂, N₂H⁺ の 3 本の輝線を検出した (図 5)。これらの輝線強度の比を見ると、3 つの天体は星形成活動の規模が異なるにもかかわらず、巨大分子雲サイズ (10 pc) のスケールでは同じ化学組成に見えることがわかった。即ち、このスケールの化学組成には個々の星形成活動の影響は顕著に現れていない。また、3 天体を詳しく比較すると、星形成活動のない CO Peak 1 で CS, SO などの硫黄を含む分子の存在比が、他と比べてやや高い特徴が見られた。その原因としては重元素量の少なさから紫外線放射の影響の可能性と、領域ごとに硫黄の depletion の程度が異なっている可能性が考えられる。

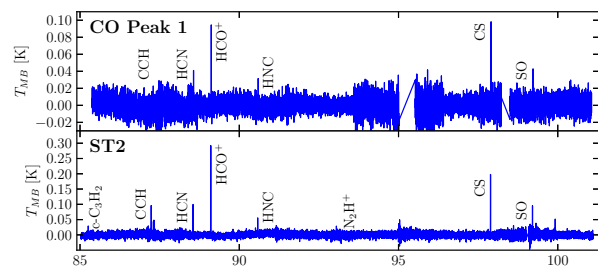


図 0.1.5: Spectral line survey of two molecular clouds in LMC

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。サブミリ波帯においては、SIS ミク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。

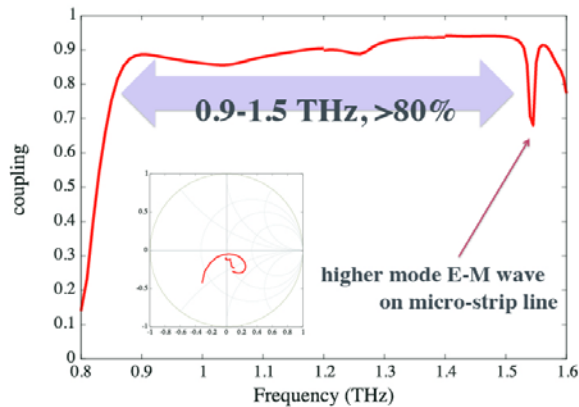


図 0.1.6: Coupling efficiency of the wide-band waveguide-type HEB mixer

【ワイドバンド導波管ミキサの設計】我々のグループで作成、開発を進めている THz 帯の電波受信機は、望遠鏡への試験搭載・観測を行う段階まで来ている。今後の更なる性能向上として、受信周波数帯域を大幅に広げた新型受信機の開発を進めている。現在の受信機は、ターゲットとしている 0.9 THz、1.3-1.5 THz の観測帯域に対し別々の受信素子を使っている。この周波数帯を単一受信素子でカバーする受信機を開発し、最終的に ASTE に搭載ことを目標としている。本年度、設計した導波管回路、評価光学系をもとに HEB 素子の評価系を構築した。今後、この評価系を用いて素子の作成、性能評価を行っていく予定である。このような設計の受信機を作成・運用することにより、効率よく天体を観測することが可能になる。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。

【2013 年度の ASTE 望遠鏡への搭載実験】我々のグループでは、自作した超伝導ホットエレクトロンポロメータ (HEB) を用いたカートリッジ型 THz 帯受信機を作成し、2011 年度より ASTE 望遠鏡へ搭載・観測実験を行っている。これまでに、0.9 THz 帯における月・木星からの連続波と分子雲からの CO(8-7) の輝線の受信に成功している。今年度は科学観測を

目指し、ASTE 望遠鏡への受信機搭載実験を行った。本年度の実験では、受信機立ち上げの際にいくつかのトラブルが発生した。最終的に、デュワー外部から準光学的に入射している基準周波数信号 (LO) の強度が十分に入らず、観測に至ることができなかった。前年度以前にはこの問題は生じておらず、本年度の実験において LO 信号を導入するための光学系の調整になんらかの問題があった可能性が高い。この問題の解決のためには、LO 信号をデュワー側壁窓から導入するのではなく、他の低い周波数向けの受信機と同様にデュワー内部の冷却ステージに設置した周波数通波器から導入する方法が有効である。これにより、これまでのような受信機搭載後の光学系調整が不要となるため確実に動作させることができる。上記のような手法へと変更するため、受信機カートリッジの改造を行った上で、ASTE 望遠鏡への搭載実験に挑戦する予定である。

【冷却中間周波増幅器の製作】HEB ミキサでダウンコンバートした中間周波を低雑音で増幅することは、受信機雑音の低減のために重要である。これまで市販の冷却増幅器を用いてきたが、バンド幅が低周波側に伸びていないこと、入力インピーダンスが 50 Ω に規格化されているので、HEB ミキサとのマッチングのためにアイソレータが必要であるなどの問題があった。そこで、中間周波増幅器を HEB ミキサに最適化して設計できるように、冷却増幅器の開発を国立天文台の鶴澤佳徳准教授と小嶋崇文助教との共同研究で進めている。本年度は、SiGe を用いた Heterojunction Bipolar Transistor による増幅器の設計製作と冷却実験を行い、初期性能として満足できる結果を得た。

【準光学型 THz 帯 HEB ミキサの開発】超伝導 HEB 細線を形成する際に誘導性結合プラズマエッチングの前工程として酸素クリーニングを導入することで、エッチング時の再付着などを軽減し、超伝導転移を示す素子の歩留りを著しく向上させた。また、超伝導 HEB 細線の電流-電圧特性のモデル化を行い、抵抗-温度特性とセルフコンシステントに解くことで、電流-電圧特性の複雑な変化を再現させた。これにより、中間周波出力の利得-電圧依存の多様なパターン/利得性能を再現することが可能になると期待される。さらに、開いた空間での無限遠の放射を計算するのに適した、仮想境界/近似を用いない有限境界要素法を導入して、準光学ツインスロットアンテナのシミュレーションを実施し、受光感度を約 25 % 改善する設計改良を行った。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] 山本智、日本天文学会林忠四朗賞、日本天文学会、2014 年 3 月 20 日。

<報文>

(原著論文)

- [2] Sakai, N., Takano, S., Sakai, T., Shiba, S., Sumiyoshi, Y., Endo, Y. & Yamamoto, S. "Anomalous ^{13}C Isotope Abundances in C_3S and C_4H Observed toward the Cold Interstellar Cloud, Taurus Molecular Cloud-1", J. Phys. Chem. A, 117, 9831 (2013)

- [3] Sakai, N. & Yamamoto, S. “Warm Carbon-Chain Chemistry”, *Chem. Rev.*, 113, 8981 (2013).
- [4] Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Kahane, C., Bottinelli, S., Caux, E., Demyk, K., Vastel, C., Coutens, A., Taquet, V., Ohashi, N., Takakuwa, S., Yen, H.-W., Aikawa, Y., & Yamamoto, S. “Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar”, *Nature*, 507, 78 (2014)
- [5] Sakai, T., Sakai, N., Foster, J. B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Kassis, M., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., & Yamamoto, S. “ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: Hot Core and Molecular Outflows”, *ApJ*, 775, L31 (2013).
- [6] Jorgensen, J. K., Visser, R., Sakai, N., Bergin, E., Brinch, C., Harsono, D., Lindberg, J. E., van Dishoeck, E. F., Yamamoto, S., Bisschop, S., & Persson, M. V. “A Recent Accretion Burst in the Low-mass Protostar IRAS 15398-3359: ALMA Imaging of Its Related Chemistry”, *ApJ*, 779, L22 (2013).
- [7] Fontani, F., Sakai, T., Furuya, K., Sakai, N., Aikawa, Y., & Yamamoto, S. “DNC/HNC and N_2D^+/N_2H^+ Ratios in High-Mass Star-Forming Cores”, *MNRAS*, 440, 448 (2014).
- [8] 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*, in press.

(国内雑誌)

- [9] 坂井 南美、低質量原始星天体における暖かい炭素鎖化学の提唱とその進展、日本天文学会 天文月報、Vol. 106, No. 2, 2013.

(学位論文)

- [10] 山口貴弘、”Classification of Shock Chemistry by Pre-shocked Conditions” (博士論文)
- [11] 猪熊宏士、「暗黒星雲における OH 吸収線の発見とその物理的意味」 (修士論文)
- [12] 西村優里、「重水素濃縮に注目した星間分子雲の物質進化の探求」(修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [13] Sakai, N. “Astrochemistry in Star/Planet Forming Regions”, ALMA Development Workshop, NAOJ, Mitaka, Tokyo, Japan, Jul. 7-8, 2013.
- [14] Sakai, N. “New carbon-chain chemistry found in solar-type star-forming regions”, 247th American Chemical Society National Meeting 2014, Dallas Convention Center, Dallas, US, Mar. 16-21, 2014.

(国内会議)

一般講演

【天文学会 2013 年秋季年会、東北大学、2013 年 9 月 10 - 12 日】

- [15] 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」, P116a
- [16] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、Lindberg, J., Bisschop, S., Jorgensen, J.K., van Dishoeck, E.F., 「ALMA によるおおかみ座 Class 0 原始星 IRAS 15398-3359 の観測」, P126c
- [17] 山口貴弘、高野秀路、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「超新星残骸 IC443 の衝撃波化学」, Q04a

【天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学、2014 年 3 月 19 - 22 日】

- [18] Sakai, N., Sakai, T., Oya, Y., Yamamoto, S.(Univ. Tokyo), Hirota, T., Ohashi, N. (NAOJ), Takakuwa, S., Yen, H-W. (ASIAA), Aikawa, Y. (Kobe Univ.), Ceccarelli, C. (IPAG), and IPAG group members(France), 「A Drastic Chemical Change in Protostellar-Disk Formation: IRAS 04368+2557 in L1527」, B07a
- [19] 大屋瑠子、坂井南美、渡邊祥正、山本智、酒井剛、廣田朋也、Lindberg, J., Bisschop, S., Jorgensen, J.K., van Dishoeck, E.F., 「ALMA によるおおかみ座 Class 0 原始星 IRAS 15398-3359 の観測」, P111a
- [20] 渡邊祥正、古屋隆太、坂井南美、山本智、酒井剛、「若い大質量原始星 NGC 2264 CMM3 における 0.8 mm 帯分子輝線サーベイ」, P131a
- [21] 相馬達也、坂井南美、渡邊祥正、山本智、「Non-thermal Desorption in the Cold Molecular Cloud: TMC-1」, P132a
- [22] 下西隆、西村優里、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 帯スペクトルラインサーベイ 1. 高密度ガス探査」, Q14a
- [23] 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 帯スペクトルラインサーベイ 2. 高感度観測」, Q15a
- [24] 猪熊宏士、坂井南美、前澤裕之、Karl Menten、山本智、「OH 基底状態遷移の吸収線の発見と統計平衡計算による解析」, Q18a

招待講演

- [25] 坂井 南美、「A Drastic Chemical Change in Protostellar Disk Formation」, 原始惑星系円盤研究会、国立天文台、2013 年 8 月 19-22 日
- [26] Satoshi Yamamoto, 「Astrochemistry with ALMA」, 日本天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学、2014 年 3 月 20 日、B05r

公開講演

- [27] 坂井 南美、「電波観測で探る星の誕生 -太陽系の奇跡-」, 東京大学理学部公開講演会、東京大学、2013 年 4 月 20 日
- [28] 坂井 南美、「分子の誕生と星間物質」, 日本物理学会科学セミナー、東京大学、2013 年 8 月 22-23 日

II

Summary of group activities in 2013

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 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.