

理解を一挙に進展させるであろう。

2 分野 A

2.1 山本研究室

2.1.1 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。

【なぜ電波を観測するのか】星間分子雲の温度はおよそ10 K程度と低い。この「宇宙の中でも最も低温の天体」を観測するには、最もエネルギーの低い電磁波である「電波」が有効である。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、厚い星間物質に含まれた星形成の核心部分を容易に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する。それらの観測により、星間分子雲の運動や分子組成を捉えることができる。

【ALMA（アルマ）に向けて】近年、ミリ波、サブミリ波観測の進展は著しい。超伝導技術を用いた低雑音ヘテロダイン受信機の実現がその背景にある。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。しかし、感度、分解能はまだ不十分である。それを解決するのがALMA（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array）である。ALMAは、南米チリの標高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望遠鏡（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、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

【テラヘルツ帯観測技術の開拓】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、上で述べた星・惑星系形成における物質進化の要を押さえることができる。世界的には2009年5月に打ち上げられたHerschel衛星によりテラヘルツ帯観測のフロンティアが開かれつつある。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、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うことを計画している。本研究室は、1998年から2005年までの間、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、テラヘルツ天文学を創生したいと考えている。

2.1.2 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、電波観測により大きな進歩を遂げつつある。その結果、低質量星近傍の分子組成が天体によって大きく異なることがわかってきた。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低質量星（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と見られる。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、星形成を探る新しい手段として注目されている。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、低質量星形成領域を中心に幅広く研究を進めている。

L1527における CH_3D の検出

メタン(CH_4)は、星間空間において最も基本的な有機分子であり、星間塵氷層の主要な構成物質でもある。しかし、回転遷移が禁制であることから、低温星間分子雲での存在は確認されてこなかった。このような状況にあって、我々は、メタンの重水素化物である CH_3D に着目し、アリゾナ大学のSMT 10 m望遠鏡を用いて、おうし座のL1527原始星方向でその回転遷移輝線($J_K = 1_0 - 0_0$; 232.6 GHz)の探索を行った。60時間に及び観測の結果、そのスペクトル線を検出に初めて成功した。L1527は、代表的

WCCC 天体であり、CH₄ の蒸発をきっかけとして炭素鎖分子が形成されていると考えられている。今回の CH₃D 検出は、我々が提案した WCCC のメカニズムを支持する結果と言える。

TMC-1A の高励起スペクトル線

上で述べたように、同じ進化段階 (Class 0) にある低質量原始星でも分子組成は大きく異なる。そこで、次に問題となるのが、「この分子組成の多様性が惑星系形成に向けてどのように進化していくのか」という点である。そこで、我々は、L1527 と同じ領域にある Class I 天体 TMC-1A において、野辺山 45 m 望遠鏡や IRAM 30 m 望遠鏡を用いて様々な炭素鎖分子のスペクトル線観測を行った。その結果、高励起スペクトル線において、低励起のスペクトル線 (6.3 km s⁻¹) とは異なる視線速度 (5.8 km s⁻¹) の成分を検出した。この 5.8 km s⁻¹ 成分は、原始星方向に集中していることが確認でき、TMC-1A が L1527 の進化したものに相当する天体である可能性が高まった。今後、化学的多様性の進化を理解するにあたり、Class I の WCCC 天体を発見できたことは非常に大きな成果と言える。

Lupus-1A の発見

我々は、最近、炭素鎖分子のスペクトル線が全天で最も明るい天体 Lupus-1A を発見した。アメリカ国立天文台の 100 m 電波望遠鏡による観測で、Lupus-1A には C₆H や C₈H、HC₉N など長い炭素鎖を持つ分子が豊富に存在していることがわかった。1976 年に TMC-1 という炭素鎖分子が豊富な星なしコアが発見されて以来、これを凌ぐ天体は見つかってこなかった。しかし、南天のおおかみ座の Lupus-1A は、炭素鎖分子の存在量が TMC-1 とほぼ同じであり、「第二の TMC-1」とも言うべき特異な天体であることがわかった。そればかりか、TMC-1 でも検出されていない C₄H⁻ などの負イオンも検出することができた。Lupus-1A の発見により、炭素鎖化学の理解や未知の分子の探査に大きな進展をもたらすであろう。

低質量星形成領域の重水素濃縮

低温の星間分子雲では、重水素は分子に濃縮される。宇宙における重水素の存在比は D/H ~ 10⁻⁵ であるが、星間分子雲中の分子における比は 0.01 - 0.1 と高い (重水素濃縮)。原始星が誕生すると、その近傍の温度が上がり、この比が低くなることが期待される。しかし、その時間スケールは分子イオンでは 100 yr 程度と短い、中性分子では 10⁴ - 10⁵ yr と長い。従って分子イオンの重水素濃縮度は原始星方向で下がるが、中性種の重水素濃縮度は原始星誕生直前の状態を保持すると期待される。そこで、低質量 class 0 原始星 IRAS16293-2422 と L1551 について、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて観測を行った。そ

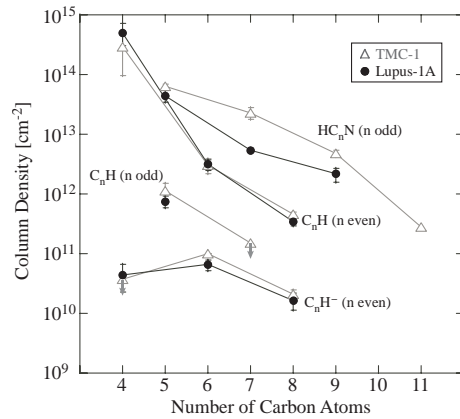


図 2.1.1: Column densities of carbon-chain molecules in TMC-1 and Lupus-1A

の結果、DCO⁺/H¹³CO⁺ 比は原始星方向で確かに減少していることがわかった。一方、DNC/HN¹³C については変化がなく、分子種によって重水素濃縮度の変化の違いがあることが確かめられた。

系外銀河の GMC スケールでの分子組成

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。その探求にはこれまで GMC の物理状態や運動を直接調べるアプローチがとられてきたが、GMC が置かれている環境が分子組成に及ぼす影響を調べる手法も、相補的に有効と考えられる。しかし、活動銀河核や爆発的星形成領域などの極限的環境下にある分子ガスを除き、GMC スケールでの分子組成の系統的研究はほとんどない。我々は、野辺山 45 m 望遠鏡を用い、近傍円盤銀河 M51 の渦状腕に付随する GMC について 90 GHz 帯のスペクトル線サーベイを行った。観測の結果、CCH、HNCO、CH₃OH、CS、C¹⁸O、¹³CO を検出した。系外銀河の渦状腕において、これほど多くの分子が同時に検出されたのは初めてである。この結果は、GMC スケールの構造の形成・進化の研究に対しても、分子組成からの探究が可能であることを示している。

2.1.3 スペクトル線サーベイ観測

国立天文台野辺山観測所のレガシープロジェクトの一つとして、45 m 望遠鏡を用いた衝撃波領域 L1157 B1 と低質量星形成領域 L1527 (WCCC 天体) のスペクトル線サーベイ、および ASTE 10 m 望遠鏡を用いた衝撃波領域 BHR71 と星形成領域 (IRAS15398-

3359, RCrA IRS7B, G28.34) のスペクトル線サーベイを推進している。ある周波数範囲のスペクトル線をくまなく観測することで、それぞれの分子組成の全貌を先入観なく明らかにしつつある。

低質量星形成領域 L1527

L1527 (距離 140 pc) における WCCC の全貌を明らかにする目的で、波長 3 mm 帯のスペクトル線サーベイ観測を野辺山 45 m 望遠鏡を用いて行っている。この天体ではスペクトル線幅が狭いので (~ 0.5 km/s)、一度に観測できる周波数範囲に限られる。それにもかかわらず、これまでの 4 年間の観測で、83-92 GHz の範囲をノイズレベル 5 mK 以下の高感度でサーベイし、様々な炭素鎖分子やそれらの重水素同位体種・ ^{13}C 同位体種のスペクトル線を検出した。また、多くの未同定線も見出された。一方で、 HCOOCH_3 や CH_3OCH_3 など、IRAS16293-2422 を始めとするホットコリノ天体で豊富に存在する大型飽和有機分子は検出されなかった。L1527 におけるラインサーベイの結果は、WCCC の機構の理解を進めるだけでなく、他の低質量星形成領域の分子組成を理解する上でも大いに役立つと期待される。

衝撃波領域 L1157 B1

宇宙空間では、星形成領域、超新星残骸、銀河中心など、至る所に衝撃波現象が見られる。我々は、衝撃波領域の化学過程を明らかにするため、L1157 B1 のラインサーベイ観測を野辺山 45 m 望遠鏡を用いて行っている。L1157 B1 は、低質量原始星 IRAS 20386+6751 (距離 440 pc) から吹き出した双極分子流が周辺ガスに衝突して生じた衝撃波領域である。昨年までに 81.5-94.5 GHz、96.3-97.5 GHz の範囲が観測されており、本年度は新しい自己相関型分光計を用いてさらに 94.5-96.3 GHz、97.5-115.5 GHz 帯の観測を進めた。その結果、28 種類の分子 (同位体種を除く) の 120 本の輝線を検出し、L1157 B1 の分子組成のほぼ全容を捉えることができた。

本年度の第 1 の成果は、炭素鎖分子 $\text{CCS}(J_N = 9_8 - 8_7, 8_9 - 7_8, 8_7 - 7_6, 7_6 - 6_5)$ の検出である。炭素鎖分子は、これまで星なしコアなどの冷たい分子雲でよく観測されるが、衝撃波領域では注目されてこなかった。我々が検出した輝線は速度幅が 5 km s^{-1} 程度あり、 CCS のような炭素鎖分子が周辺ガス中ではなく、衝撃波領域に主に存在していることを示している。 CCS の生成と衝撃波がどのような関わりを持つのかは謎であり、今後の課題である。

第 2 の成果は PN の検出である (図 2.1.2)。PN は星間分子雲で知られる唯一のリンを含む分子であり、これまで Sgr B2、Ori KL、W51 といった大質量星形成領域でのみ検出されてきた。しかし、これらの領域は大規模かつ複雑であるため、PN の生成過程の観測的理解に結びつかなかった。今回、我々は、PN ($J = 2-1$) の輝線を L1157 B1、L1157 B2 の 2 つの衝撃波領域で検出した。一方、L1157 原始星方向で

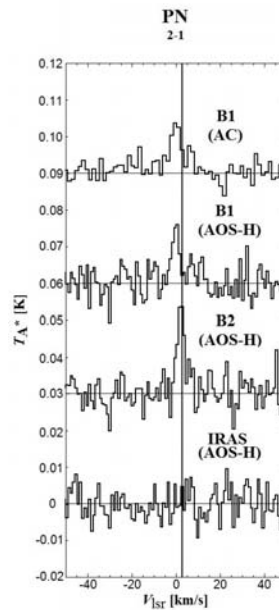


図 2.1.2: The PN ($J = 2-1$) spectra observed toward the B1, B2, and protostar positions in L1157

は検出できなかったことから、PN の生成に衝撃波が何らかの役割を果たしていることがわかった。

70 GHz 帯 2SB 受信機の開発

野辺山 45 m 望遠鏡によるスペクトル線サーベイ観測を 70 GHz 帯まで拡張する目的で、2SB 型の SIS 受信機を製作した。70 GHz 帯には多くの分子の重水素化物や、 CH_2 , NS などの基本的分子のスペクトル線が存在する。スペクトル線サーベイの観測領域としては重要であるにもかかわらず、80-115 GHz 帯に比べて世界的にも観測的空白域となっている。本年度、製作した受信機を野辺山 45 m 望遠鏡の旧ビーム系に搭載し、試験観測を行った。72 GHz での受信機雑音は 300 K 程度であり、これまでの受信機 (S80) の $1/2$ である。直交 2 偏波が同時観測できることを考えると、8 倍の観測効率の向上が見込まれる。

ASTE によるラインサーベイ

チリに設置した ASTE 10 m 鏡を使い 345 GHz 帯のスペクトル線サーベイを、6 つの天体に対して行った。観測天体は、低質量 class 0 原始星でホットコリノ候補天体の R CrA IRS7B、WCCC 天体 IRAS 15398-3359、赤外線暗黒星雲 G28.34 (MM1、MM4、MM9)、および低質量原始星 BHR71 に付随する衝撃波領域である。R CrA IRS7B については、332 - 364 GHz の範囲を r.m.s 雑音温度 (T_{MB}) で 11-21 mK という高い感度で観測した (図 2.1.3)。その結果、17

の基本的な分子及び重水素化合物を含む 16 の同位体分子を検出した。これらの分子は 3 個以下の重い原子を含む分子であり、より複雑な有機分子は検出されなかった。R CrA IRS7B は、これまで H₂CO や CH₃OH のスペクトル強度からホットコリノ天体であると考えられてきた。しかし、本観測から CN や CCH 等が典型的なホットコリノ天体である IRAS 16293-2422 よりも多いことがわかり、ホットコリノと WCCC の中間的な性質を持つ可能性が示された。

さらに、本サーベイでは複数の天体で同じ周波数領域の分子輝線スペクトルが得られたため、先入観なく天体ごとの分子組成をスペクトルパターンとして比較可能である。例えば、大質量星形成領域の赤外線暗黒星雲 G28.34 のパターンは、衝撃波領域の BHR71 のパターンに類似している。これは星形成に伴うアウトフローが卓越しているためと考えられる。このような「化学分析」は、天体の構造と進化を探る新しい手法となると期待される。

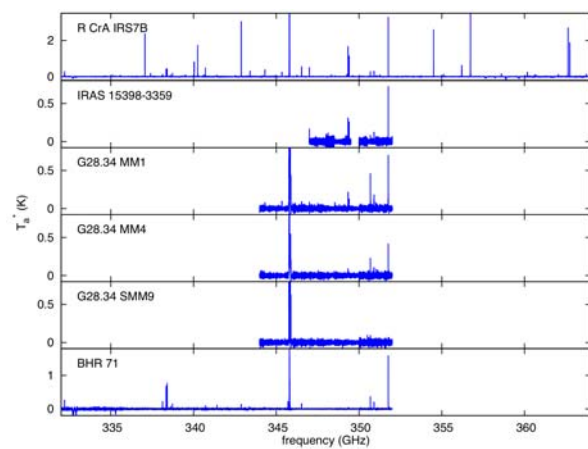


図 2.1.3: Spectral line survey with ASTE

2.1.4 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、超伝導体をサブマイ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。

HEB ミクサーの開発と評価

本研究室では 800 GHz 帯、1.5 THz 帯の超伝導 HEB ミキサを開発している。それには数 nm の膜厚の超伝導薄膜を用いる。しかし、高い超伝導転移温度を維持したまま超伝導物質を数 nm 厚に成膜することは技術的に難しい。超伝導素材としては、世界的に NbTiN、NbN が用いられている。NbTiN はどんな基板に成膜してもある程度高い転移温度を示すため、本研究室でも当初 NbTiN を用いて開発を進めてきた。一方、NbN は高い転移温度を得るためには、基板の種類が限られる。我々の目指す宇宙観測应用到に最適な導波管型 HEB ミキサには石英基板が必須である。そのため、NbN を用いた素子の製作は事実上不可能であった。しかし、昨年度、NbN と石英基板の間に AlN 緩衝層を導入することで高い転移温度をもつ NbN 薄膜が得られることを見出した。そこで現在、NbTiN、NbN+AlN 薄膜を用いた 2 種類の HEB ミキサを開発している。

宇宙からの微弱な信号を捉えるために、HEB ミキサは低雑音である必要がある。我々は雑音性能が素子のインピーダンス、つまり、マイクロブリッジのサイズに依存すると考え、様々なサイズのマイクロブリッジをもつ素子を作成、測定した。その結果、NbTiN 素子では 800 GHz 帯で受信機雑音温度 470 K、1.5 THz 帯では 570 K という低雑音化に成功した。また、NbN+AlN 素子でもそれぞれ 450 K、1100 K を達成した。これらの性能は実際の観測に用いるに十分な性能である。特に 1.5 THz 帯の NbTiN 素子の 570 K は量子雑音の約 8 倍にあたり、現在報告されている中では世界最高性能である。

ASTE 搭載用受信機的设计、製作

チリのアタカマ砂漠にある ASTE 10 m 望遠鏡に搭載する受信機カートリッジを製作した。観測周波数帯は 900 GHz/1.3-1.5 THz 帯である。これらの周波数帯には基本的な原子、分子の出す回転スペクトルが含まれ、それらの観測により、星間分子雲の物質進化の「要」を捉えることができる。受信機はこの 2 つのバンドをカバーする。主鏡から導かれたビームはワイヤグリッドで直交 2 偏波に分けられ、デュワー外から準光学的に導入された局部発振信号と結合した後に導波管型 HEB ミキサに導かれる。ASTE 望遠鏡の口径は 10 m であるが、本観測では鏡面精度のよい内側約 7 m のみを使用する。それでも主鏡径 3 m の Herschel 宇宙望遠鏡の 2 倍以上の空間分解能をもつ。2011 年度の試験観測に向けて、組み上

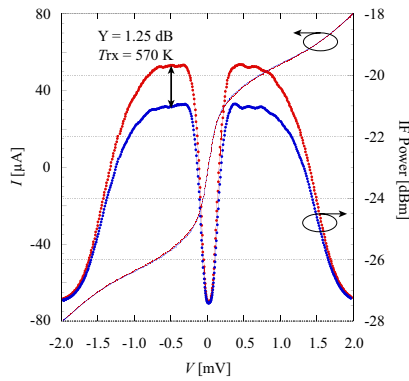


図 2.1.4: I-V curve and the RF response of the 1.5 THz waveguide HEB mixer

げと性能評価が進行中である。

加熱成膜を取り入れた HEB ミクサの製作

HEB ミクサの IF 帯域を広げるためには、数 nm 厚の超伝導薄膜が必要である。超伝導薄膜の高品質化に効果的と考えられているのが成膜時に基板を高温に加熱する「基板加熱」である。基板を高温にすることで、高い結晶性を持つ膜を成膜できると期待される。本研究室では昨年 NbTiN 膜の成膜装置に赤外線ランプを用いた基板加熱機構を導入しており、これを用いて基板加熱が与える影響を調べた。その結果、400 に加熱して成膜をした場合、厚さ 8 nm の NbTiN 膜で T_c が 6.8 K から 10.1 K への上昇が見られた。また昨年報告した AlN による緩衝層を入れる方法と併用すると T_c は 13.3 K まで上昇した。これは基板加熱による上昇分と緩衝層による上昇分の和と同程度の値である。

基板加熱による膜質の向上が確かめられたため、これを HEB ミクサの製作工程に取り入れる方法について検討した。これまでのプロセスでは有機レジストを用いたリフトオフ用いているので、基板を加熱するとレジストが焦げ付いてしまう問題があった。これを解決する方法として、有機レジストのパターンを一旦アルミニウムに転写し、エッチングにより目的の形に超伝導膜を加工するという方法を考案した。この方法を用いて基板加熱過程を取り入れた HEB ミクサ製作を行ったところ、必要な加工精度は確保でき、超伝導転移も確認された。この方法の最適化を進め、HEB ミクサの性能向上を図りたい。

準光学 HEB ミクサの製作

1.9 THz 以上の高周波 HEB ミクサの開発では、特に細線の微細化と薄膜化の改良に取り組んだ。まず幅 1 μm 、長さ 0.2 μm 、厚み 6 nm の NbTiN 超伝導

細線を作成し、これを準光学型 2 次元平面アンテナに集積して、4K パルス管冷凍機で冷却を行った。その結果、強い超伝導電流が観測され、1.9 THz 帯の CW 発振信号 (数 μW) を照射しても、十分に細線を励起できないほどであった。このため、NbTiN の製膜プロセスの最適化を行いながら、細線長 0.1-0.15 μm 、厚み 3-5 nm の超薄膜化の条件出しを進めた。さらに細線の経年劣化の抑制と、IF 広帯域化を目的とし、細線に AlN 膜をスパッタするプロセスについてもテストした。本研究は、名古屋大学大学院理学研究科の福井康雄教授・前澤裕之助教授らとの共同開発により推進している。

3 THz 帯量子カスケードレーザーの開発

2 THz を超える高い周波数帯域では、局部発振器として十分な光源を入手することが難しい。そこで、量子カスケードレーザー (QCL) に着目し、情報通信研究機構 (NICT) 寶迫グループとの共同で開発を行った。製作プロセス条件の最適化、特にドライエッチングの導入により、導波路幅の小さな素子を製作できるようになった。その結果、発振周波数 3.1 THz において連続発振に国内ではじめて成功した。出力は最大で 34 μW であり、連続発振における最高動作温度は 74 K であった。

上述のように開発した QCL を局部発振器として用い、本研究室で開発した準光学型 HEB ミクサによる 3 THz 帯ヘテロダイン受信機を構築した。QCL と HEB ミクサはそれぞれ別々の液体 He デュワーに搭載し、ビームスプリッターにはワイヤグリッドを用いた。位相敏感検波を利用した Y-factor 法で雑音温度の測定を行ったところ、受信機雑音温度 5600 K (DSB) を得た。この値は、光学系による損失を考慮すると 2100 K となる。これは 3 THz 帯の HEB ミクサ受信機としてほぼ世界的な水準である。これにより、我々が開発してきた THz QCL が局部発振器として十分に使用に耐えることが確かめられた。また、THz 帯 HEB ミクサには一般に NbN 薄膜が用いられているが、NbTiN 薄膜を用いてもほぼ同等な性能を得られることがわかった。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Sakai, N. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, " A Survey of Molecular Lines toward Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-mass Star Formation ", *Astrophys. J.*, **714**, 1658 (2010).
- [2] N. Sakai, T. Shiino, T. Hirota, T. Sakai, and S. Yamamoto, " Long Carbon-chain Molecules and Their Anions in the Starless Core, Lupus-1A ", *Astrophys. J.*, **718**, L85 (2010).
- [3] T. Hirota, N. Sakai, and S. Yamamoto, " Depletion of CCS in a Candidate Warm-carbon-chain-chemistry Source L483 ", *Astrophys. J.*, **720**, 1370 (2010).

- [4] N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, "Distribution of Carbon-Chain Molecules in L1527", *Astrophys. J.*, **722**, 1633 (2010).
- [5] Watanabe, Y., Sorai, K., Kuno, N., and Habe, A., "Refined molecular gas mass and star-formation efficiency in NGC 3627", *MNRAS*, 411, 1409-1417 (2011).
- [6] 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 (2011).
- [7] 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 B1 Shocked Region", *Publ. Astron. Soc. Japan* in press.
- [8] H. Maezawa, T. Yamakura, T. Shiino, S. Yamamoto, S. Shiba, N. Sakai, Y. Irimajiri, L. Jiang, N. Nakai, M. Seta, A. Mizuno, T. Nagahama, and Y. Fukui, "Stability of a Quasi-Optical Superconducting NbTiN Hot-Electron Bolometer Mixer at 1.5 THz Frequency Band", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, in press.
- (国内雑誌)
- [9] 坂井 南美、「化学の目で見た星形成：星形成領域の多様性」、*日本惑星科学会誌*、Vol. 20, No. 1, 2011
- (学位論文)
- [10] 芝祥一、「Development of Terahertz Quantum Cascade Lasers and Application to Heterodyne Receivers for Astronomical Observations」, 博士論文 (2011年3月)
- [11] 山口貴弘、「星形成領域 L1157 における衝撃波化学」, 修士論文 (2011年3月)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [12] Sakai, N. "Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions", *The Early Phase of Star Formation EPoS 2010*, Castle Ringberg, Germany, June 2010.
- [13] Sakai, N. "Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions", *The 5th Zermatt ISM Symposium*, Zermatt, Switzerland, Sep. 2010.
- [14] Watanabe, Y., Sakai, N., Lindberg, J., Jorgensen, J., Bisschop, S., and Yamamoto, S., "Line survey of RCrA IRAS7B in the 345GHz window with ASTE", *Workshop on Interstellar Matter 2010*, Sapporo, Japan, September 13 -15, 2010
- [15] Watanabe, Y., Sorai, K., Kuno, N., and Tosaki, T., "Molecular Gas and Star Formation in Barred Spiral Galaxy NGC 3627", *The 5th Zermatt ISM Symposium*, Zermatt, Switzerland, September, 2010
- [16] T. Yamaguchi, M. Sugimura, N. Sakai, T. Sakai, T. Umemoto, S. Takano, S. Yamamoto, H. Nomura, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, S. Takakuwa, T.J. Millar, and NRO 45 m Line Survey Group, "Line Survey of L1157 B1 Shocked Region", *The 5th Zermatt ISM Symposium*, Zermatt, Switzerland, September 2010.
- [17] S. Shiba, N. Sekine, Y. Irimajiri, I. Hosako, T. Koyama, H. Maezawa, and S. Yamamoto, "Development of THz Coherent Sources Using Quantum Cascade Lasers," *Progress in Electromagnetics Research Symposium 1P9-36*(poster), Marrakesh, Morocco, March 2011
- 招待講演
- [18] N. Sakai, "Recent Progress of Carbon-Chain Chemistry in Molecular Clouds", *Workshop for Interstellar Matter 2010*, ILTS, Hokkaido University, Sapporo, Japan, Sep. 2010 .
- [19] S. Yamamoto, "Chemical Evolution of Low-Mass Star Forming Regions", *2010 Western Pacific Geophysics Meeting*, Taipei, Taiwan, June, 2010.
- (国内会議)
- 一般講演
- [20] 坂井 南美、山本 智: 「星間分子雲における炭素鎖分子の ^{13}C 同位体異常」、分子分光研究会、東京工業大学、2010年5月
- [21] 椎野竜哉、坂井南美、酒井剛、廣田朋也、山本智、「原始星近傍での CCS、 HC_3N 分子の大局的分布」、日本天文学会秋期年会 P27b、金沢大学、2010年9月
- [22] 坂井南美、酒井剛、高野秀路、山本智、ラインサーベイチーム、「野辺山 45 m 鏡レガシープロジェクト: L1527 のラインサーベイ観測」、日本天文学会秋期年会 Q29c、金沢大学、2010年9月
- [23] 山口貴弘、杉村美佳、坂井南美、酒井剛、梅本智文、高野秀路、山本智、野村英子、相川祐理、平野尚美、Sheng-Yuan Liu, Yu-Nung Su, 高桑繁久、他 NRO 45 m ラインサーベイグループ、「L1157 の衝撃波領域におけるラインサーベイ」、日本天文学会秋季年会 Q30c、金沢大学、2010年9月
- [24] 入交芳久、芝祥一、関根徳彦、實迫巖、小山知記、前澤裕之、山本智、「局部発振器用 THz-QCL の開発」、ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システム研究会 (電子情報通信学会 電子デバイス研究会)、東北大学、2010年12月
- 招待講演
- [25] 坂井 南美 「Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions」、地球惑星連合大会、幕張メッセ、2010年5月
- [26] 坂井 南美 「星の誕生と化学進化」、第40回天文・天体物理夏の学校、ホテル日航豊橋、2010年8月