HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	テラヘルツ受信機のASTE望遠鏡への搭載実験と 実験室における分子分光実験
Author(s)	渡邉, 祥正; 酒井, 剛; 坂井, 南美
Citation	低温科学, 78, 241-251
Issue Date	2020-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.78.241
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77788
Type	departmental bulletin paper
File Information	27_p241-251.LT78.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 78 （2020） 241–251
doi: 10.14943/lowtemsci. 78. 241

テラヘルツ受信機の ASTE 望遠鏡への搭載実験と実験室における分子分光実験

渡邉　祥正[1)]*，酒井　剛[2)]，坂井　南美[3)]

2019 年 11 月 15 日受付，2019 年 11 月 19 日受理

天文学では観測のための装置開発も重要な研究テーマである．これまであまり観測されていない電磁波の波長帯の観測装置や，より高い感度の検出器を開発することで，今まで見えなかった新しい宇宙の姿を明らかにできる．電波と赤外線の中間の波長領域であるテラヘルツ帯も発展途上の波長帯のひとつである．本稿では，テラヘルツ帯の天体観測を目指して，受信機を開発し南米チリのアタカマ高原の ASTE 望遠鏡に搭載実験をしたので紹介する．また，天体観測用の装置は非常に性能が高く，実験室における様々な測定でも性能を十分に発揮する．本稿の後半では，電波天文学で使われる受信機やデジタル分光計を使った，分子分光の実験を紹介する．

Installation of THz receiver on ASTE and molecular spectroscopic laboratory experiment

Yoshimasa Watanabe[1], Takeshi Sakai[2] and Nami Sakai[3]

The terahertz band, which corresponds to a frequency range of 1–10 THz, remains relatively unexplored in both astronomy and technology. In order to observe astronomical objects from the ground in the terahertz band, we developed low-noise hot electron bolometer (HEB) mixers and built a cartridge-type heterodyne receiver using the HEB mixers. The cartridge-type receiver was installed on the ASTE 10 m radio telescope in Chile to detect molecular spectral lines from star-forming regions. In addition, we developed a molecular spectrometer in a laboratory using low-noise ALMA-type radio receivers and wide-band digital spectrometers. Accurate frequency of spectral lines of known complex organic species will be measured by the spectrometer, to interpret the results from radio astronomical observations.

キーワード：テラヘルツ，受信機開発，星間分子，分子分光
Terahertz, Receiver development, Interstellar molecule, Spectroscopy

1．はじめに

宇宙の観測では，主に天体からやってくる電磁波を検出し，観測対象の天体の構造や性質を研究する．現在では可視光のみならず，電波からガンマ線まで，あらゆるエネルギーの電磁波が観測の対象とされている．しかし，その中にはまだ技術的に観測が難しい領域もある．例えば，波長が 0.3 mm 以下（周波数は 1 THz 以上）のテラヘルツ帯である．テラヘルツ帯はちょうど電波と赤外線の中間の波長領域であり，技術的にはエレクトロニクスとフォトニクスの中間にあたる．そのため，天体の高感度観測は技術的に難しく，まだ発展の途上にある．

*連絡先
渡邉　祥正
日本大学工学部
〒963-8642　福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地
e-mail：watanabe.yoshimasa@nihon-u.ac.jp
1）日本大学工学部
College of Engineering, Nihon University, Fukushima, Japan
2）電気通信大学大学院情報理工学研究科
Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Tokyo, Japan
3）理化学研究所
RIKEN, Wako, Japan

我々のグループではこのテラヘルツ帯における地上からの宇宙観測を目指して，テラヘルツ帯受信機に使用する低雑音の超伝導検出素子を開発し，それを使った観測実験を行ってきた．

また，観測装置の開発は，未開拓の波長領域の観測を目指したものだけではなく，あらゆる波長領域において高感度，高空間分解能，広視野などのより良い観測を目指して進み続けている．最近ではアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA が建設され，さらには他の波長帯でも様々な次世代望遠鏡が建設・計画されている．天文学用に開発された検出装置は非常に感度が高いため，天文観測以外の実験室においても性能の高い検出装置として利用できる．例えば，電波観測用に開発した受信機を利用した実験室のおける分子のマイクロ波分光などがある（e.g., Wehres et al., 2018; Tanarro et al., 2019）．

本稿の前半では，天文観測においてテラヘルツ帯での観測を目指した受信機の開発と国立天文台が運用する ASTE 10 m 望遠鏡への搭載実験を紹介する．さらに，後半では天文観測用に開発された装置を利用した実験室における分子分光実験について述べる．

2. THz 受信機の ASTE 望遠鏡への搭載実験

2.1. テラヘルツ帯観測の目的

テラヘルツ帯の観測は，Herschel 宇宙赤外線望遠鏡（Pilbratt et al., 2010）によって大きく切り開かれてきた．Herschel は地球と太陽の第二ラグランジュ点に打ち上げられた望遠鏡で，大気の影響を受けることなくテラヘルツ帯の観測が可能であった．特に HIFI というヘテロダイン分光観測装置は 490 GHz から 2 THz までを観測できる装置であり（Graauw et al., 2010），これによって H_2O^+，H_2Cl^+，HCl^+，ArH^+ などの新しい星間分子の発見（Ossenkopf et al., 2010; Lis et al., 2010; De Luca et al., 2012; Schilke et al., 2014）をはじめ，多くの成果がもたらされた．テラヘルツ帯にはこのように基本的な原子やイオンの微細構造線や基本的な水素化物分子の回転スペクトル線が多数存在する．それらの原子・分子はいずれも星間雲における化学反応の要となるものであり，それらの存在量を観測により明らかにすることは星間化学の基礎を固める意味で大きな意義がある．さらに，より複雑な星間分子の生成過程の理解や，天体の形成過程の物理を明らかにする上でもこれらの分子の観測は極めて重要である．

テラヘルツ帯の電磁波は大気による吸収の影響を受けやすいため，その観測は衛星や航空機に搭載した望遠鏡で行われてきた．その場合，望遠鏡の口径は 2–3 m 程度が限界であり，さらに高い空間分解能による観測を実現するためには地上からの大型望遠鏡による観測が求められる．幸い，大気の窓と呼ばれる大気による吸収の影響をあまり受けない周波数帯が，テラヘルツ帯にも存在する（図 1）．テラヘルツ帯の大気による吸収は大気中の水蒸気量に大きく影響されるが，非常に水蒸気量が少ない条件では 0.9 THz，1.1 THz，1.35 THz，および 1.5 THz での透過が期待できる．

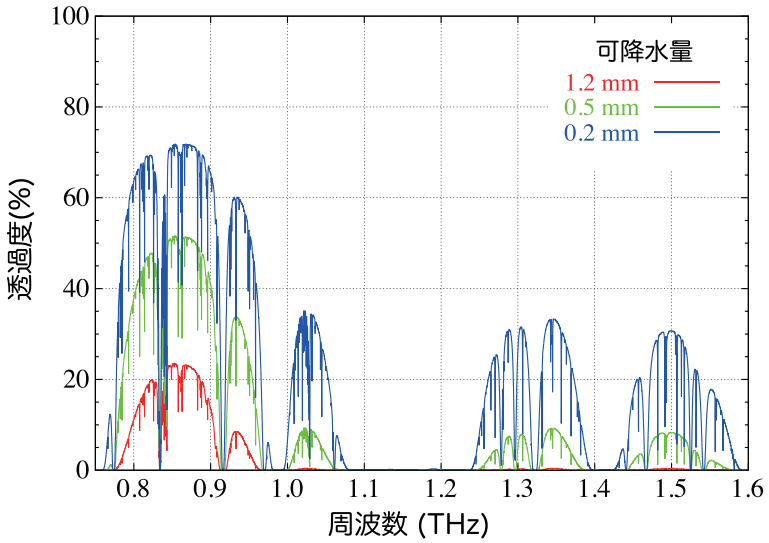


図 1：標高 5,000 m のアタカマ砂漠における大気の透過度．可降水量は大気中に含まれる水の量である．アタカマ砂漠では気象条件がよいと可降水量が 0.2 mm 程度まで下がる．

2.2. テラヘルツ帯カートリッジ受信機

比較的高い周波数（数 10 GHz 以上）の電磁波は，電子回路で直接増幅するなどの信号処理が難しい．そのため高い周波数の観測をするためには，まず受信機の中で周波数混合器（ヘテロダインミクサ）を使いより低い周波数に変換し，その後様々な信号処理をする必要がある（図 2）．このヘテロダインミクサは信号の最上流部分にあり，ここで発生する雑音がその後の増幅器で増幅されるため，この部分の雑音をできる限り少なくすることが受信機開発の要である．そのため，受信機内部は，通常，数 K に冷却して熱雑音を抑えつつ，さらに超電導素材を用いた低雑音のヘテロダインミクサを使うことで，雑音の低い受信機を実現している．

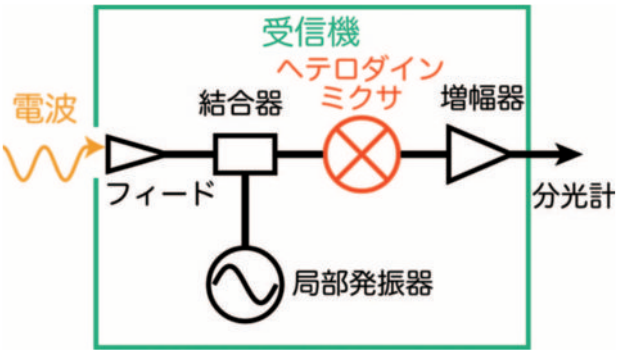


図 2：一般的な受信機の構造．宇宙からの電波はフィードによって受信機内の導波管に導かれる．その後，宇宙からの信号は局部発振器の信号と結合させ（結合器），ヘテロダインミクサで混合し差周波を取り出す．その後，低雑音の増幅器で信号を増幅し，分光計などの検出装置へ送られる．テラヘルツ帯カートリッジ受信機では，電波と局部発振器の信号をあらかじめ結合させてから，フィードによって導波管に導き，ヘテロダインミクサで混合させる構造になっている．

テラヘルツ帯での観測においても，その周波数で動作する低雑音のヘテロダインミクサの開発が不可欠である．そのための有力なデバイスのひとつ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（e.g., Siegel, 2002; Yamamoto, 2017）．そのためには，超伝導体をサブミクロンサイズにし，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ことが必要である．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，超伝導素材として NbTiN を用いた「格子冷却型」HEB ミクサ素子の開発し，電波望遠鏡に搭載可能なテラヘルツ帯カートリッジ受信機を作成した．

このカートリッジ受信機はコンパクトな構造をしており（図 3 左），電波望遠鏡に搭載された冷却ジュワーに差し込むだけで受信機を設置できる．一般的に，観測する周波数を大きく変えるためには受信機を交換しなければならないが，カートリッジ受信機のおかげでその作業を単純にかつ短時間に行える．そのため，このカートリッジ受信機の形状は ALMA や今回使用した ASTE 望遠鏡で使用する受信機にも採用されている．開発した

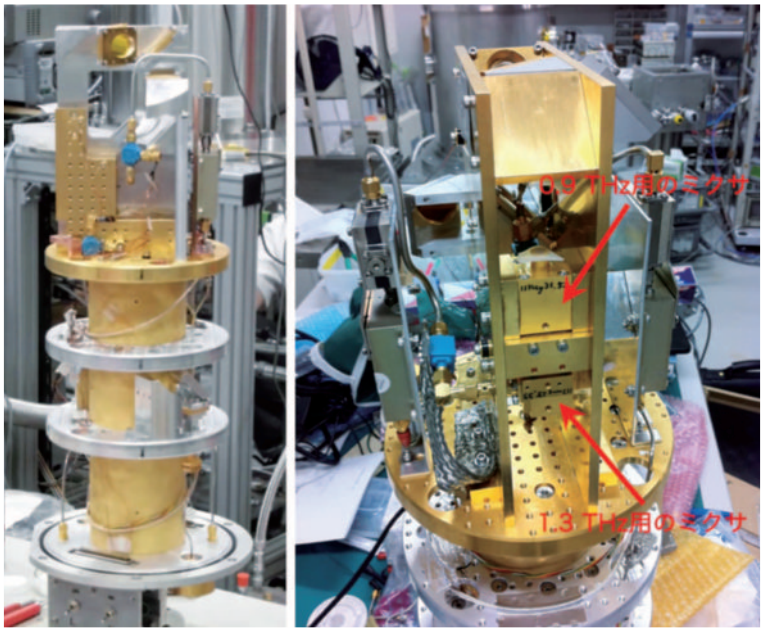


図 3：HEB ミクサ素子を搭載したカートリッジ型受信機の全体写真（左）と，0.8〜0.9 THz と 1.3〜1.5 THz の HEB ミクサを搭載した箇所（右）．

HEB ミクサは 2 種類あり，それぞれ 0.8〜0.9 THz と 1.3〜1.5 THz の周波数範囲が観測できる．これらの HEB ミクサは低雑音であり，2012 年時点で 0.81 THz と 1.475 THz において世界最高性能を達成している．また，2 つの HEB ミクサはカートリッジ受信機の中に同時に備え付けられており（図 3 右），2 つの周波数帯を同時に観測できる構成である．

2.3. ASTE 電波望遠鏡

製作したテラヘルツ帯カートリッジ受信機は，ASTE（Atacama Submillimeter Telescope Experiment）電波望遠鏡（図 4）に搭載した．ASTE は南米チリ・アタカマ高原の標高 4,860 m にある．ASTE が設置されているパンパ・ラ・ボラ（Pampa la Bola）は ALMA が設置されているサイトの一角にあり，ASTE のすぐそばに ALMA のアンテナが運ばれてきて観測していることもある．このサイトは標高が非常に高いだけでなく，砂漠地帯であり極めて乾燥している．そのため，テラヘルツ帯の観測において障害となる大気中の水蒸気の量がとても少なく，テラヘルツ帯の観測には良い環境である．一方で，現地で作業する人にとっては非常に厳しい環境でもある．特に気圧が海面の半分程度（550 hPa）しかなく，低酸素のため普段よりも判断力が低下するので，現地で作業する際には慎重に行動することが要求される．また，各種観測装置は電力の消費により発熱しており常に冷却しなければならないが，高地では空冷効果が低くなるため注意が必要である．

ASTE の主鏡の直径は 10 m であり，国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡などと比較するとそれほど大きな望遠鏡ではない．しかし，波長の短いサブミリ波帯を観測するために，設計値からの誤差が 20 ミクロン以下という非常に高い精度の鏡面を持っている．このため，ミリ波・サブミリ波だけでなく，より波長の短いテラヘルツ波の観測も可能である．しかし，アンテナの外縁部分の鏡面精度はテラヘルツ帯の観測には不十分であったため，鏡面精度が高い内側の 7 m のみを使用するように光学系を設計し試験観測を実施した．

2.4. ASTE への搭載実験

テラヘルツ受信機の ASTE への搭載実験は，2011 年，2012 年，2013 年，そして 2015 年の合計 4 回実施した．搭載実験の時期はいずれの年も 9 月から 10 月にかけてであり，南半球のチリでは晩冬から初春にあたる．この時期は大気中に含まれる水蒸気量が相対的に少ない．4 回の搭載実験の中で，2012 年と 2013 年は望遠鏡や受信機のトラブルのために，天体観測の実行には至らなかった．しかし，2011 年と 2015 年の実験では，天体からのテラヘルツ波を検出することに成功した．

2011 年の搭載実験は 9 月末から 10 月上旬の約 2 週間にわたり実施した．10 月 5 日の現地時間の夕方に 0.9



図 4：国立天文台 ASTE 10 m 電波望遠鏡．ASTE は南米チリ・アタカマ砂漠の標高 4,860 m のパンパ・ラ・ボラに設置されている．奥に見えるコンテナからアンテナを制御できる．

THz の受信機を使い，月（図 5）と木星の画像を取得することに初めて成功した．このように製作した観測装置で初めて天体を検出することを「ファーストライト」と呼んでいる．図 5 の月の画像を見て分かるように，テラヘルツ帯で見た月も，可視光で見たときと同様に月の満ち欠けがはっきりと見える．可視光では月は太陽光の反射光によって輝いているが，テラヘルツ帯では主に月の表面からの黒体放射により輝いており，その満ち欠けは月の昼と夜の温度の違いを示している．そのため，可視光では見えない月の影の部分も，テラヘルツ帯の画像では捉えられているのである．このようにこの受信機は，月の昼と夜の温度の違いを検出できるほどの高い性能であった．このときの受信機と大気の状態を総合した性能を表す指標である，室温（約 300 K）の黒体輻射と空（3 K 黒体輻射）をそれぞれ観測したときの受信機の信号のレベル差（R-Sky）は最大で 1 dB 程度であった．また，観測開始時の夕方の可降水量は 0.4 mm であったが，明け方には 0.2 mm まで低下し，観測期間中で最も良い観測条件であった．一方で，木星の観測では画像は得られたものの，その像は上下に歪んだものであった．これは，望遠鏡の副鏡が故障により制御できず，望遠鏡のピントを合わせることができなかったためである．観測で得られた木星の信号強度と実際の木星表面温度を比較することで推定した主ビーム能率は，約 30%あった．主ビーム能率は，受信機に入ってくる信号の中で，主ビームと呼ばれる望遠鏡の感度が最も高い方向から入ってくる信号の割合であり，この割合が高いほど観測感度は良くなる．今回はピントを合わせられなかったため 30%と低い値であり，天体以外の方向から入ってくる雑音の方が高い状態であった．このようなトラブルがあったものの，さらに翌 6 日の早朝には，オリオン座の星形成領域において ^{13}CO（J＝8–7：0.8813 THz）のスペクトル線の検出にも成功した．しかし残念ながら，その後の天候には恵まれず，1.3 THz の受信機を使った天体の観測はすることができなかった．

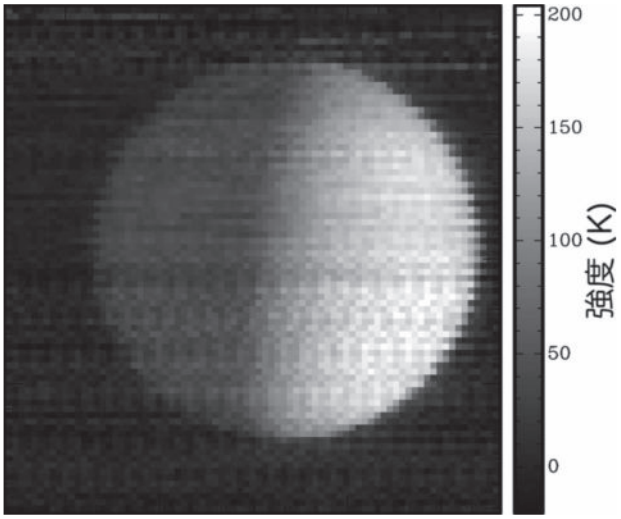


図 5：テラヘルツ受信機によって捉えられた月の画像．

2015 年の搭載実験は，9 月末から 10 月末にかけて実施した．このときも 10 月 1 日に 0.9 THz の受信機を使い月と木星からの黒体放射の観測に成功し，10 月 5 日にはオリオン座の星形成領域において ^{13}CO（J＝8–7）のスペクトル線の観測にも成功し，2011 年と同様に受信機が正常に動作していることを確認した．この搭載実験中の可降水量は最も低いときでも 0.5 mm と高めであり，R-sky は 0.35 dB と 2011 年よりもやや悪い性能であった．

受信機の性能を確認した後，IRAS 16293–2422，OMC–2 FIR4，NGC 1333 IRAS2A，R CrA IRS7B など，質量が太陽程度の軽い原始星を観測し，それぞれの天体において同じく ^{13}CO（J＝8–7）のスペクトル線を検出することにも成功した（図 6）．しかしながら 2011 年同様，その後の天気には恵まれず 1.3 THz の受信機を使った天体の観測の実行には至らなかった．この周波数帯の観測には，可降水量が 0.2 mm 以下である必要があるためである．これらの経験から，標高 4,860 m のアタカマ高原の砂漠であっても，周波数の高いテラヘルツ帯の観測はいかに難しいものであるかを実感した．

2.5. テラヘルツ受信機による観測結果

2015 年の搭載実験では，いくつかの天体についてスペクトル線を検出することができた（図 6）．例えば，南のかんむり座領域にある R CrA IRS7B は，太陽程度の質量の星が形成されている領域である．図 7 は，R CrA IRS7B を様々な望遠鏡を使い観測して得られた一酸化炭素分子と炭素原子のスペクトル線である．周波数が低いスペクトル線には速度が 5 km/s 周辺で吸収線と呼ばれるへこみが見られる．原始星の手前にある冷たい分子ガスが存在すると，そのガスが原始星からの放射を吸収するためこのようなスペクトルが見られる．吸収線がスペクトルに見られることは，その分子が存在するガスが低温であることを意味する．一方，テラヘルツ帯の ^{13}CO のスペクトル線には，そのような吸収線は見られない．また，220 GHz の同じ ^{13}CO の輝線の強度と比較して，テラヘルツ帯輝線の強度は数倍高い．この結果は，テラヘルツ帯の観測は原始星近傍の温度と密度が高いガスを捉えていることを示唆する．このように，テラヘルツ帯の観測を利用することで，ALMA のような高い空間分解能をもつ望遠鏡を使わずとも原始星の近くに

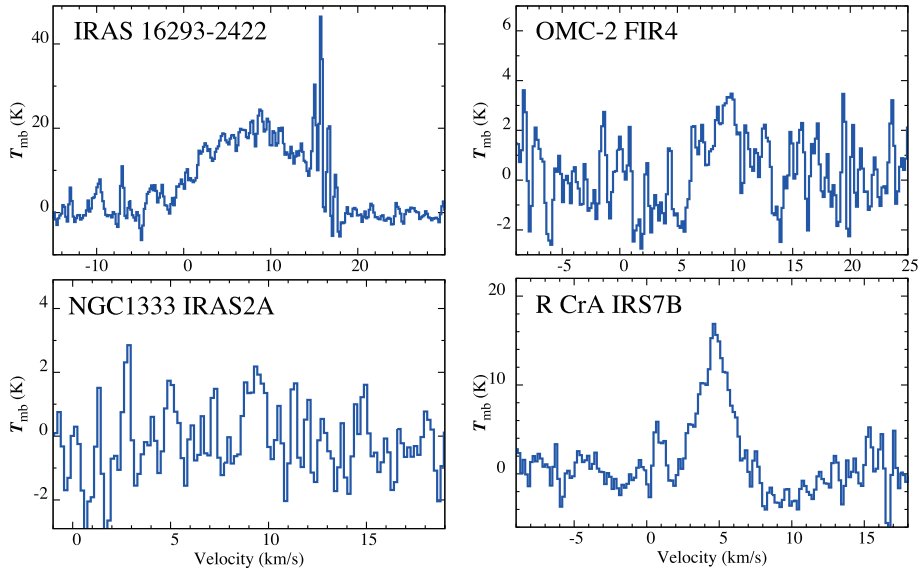


図 6：テラヘルツ受信機で検出した，^{13}CO（J=8–7：0.881273 THz）のスペクトル．

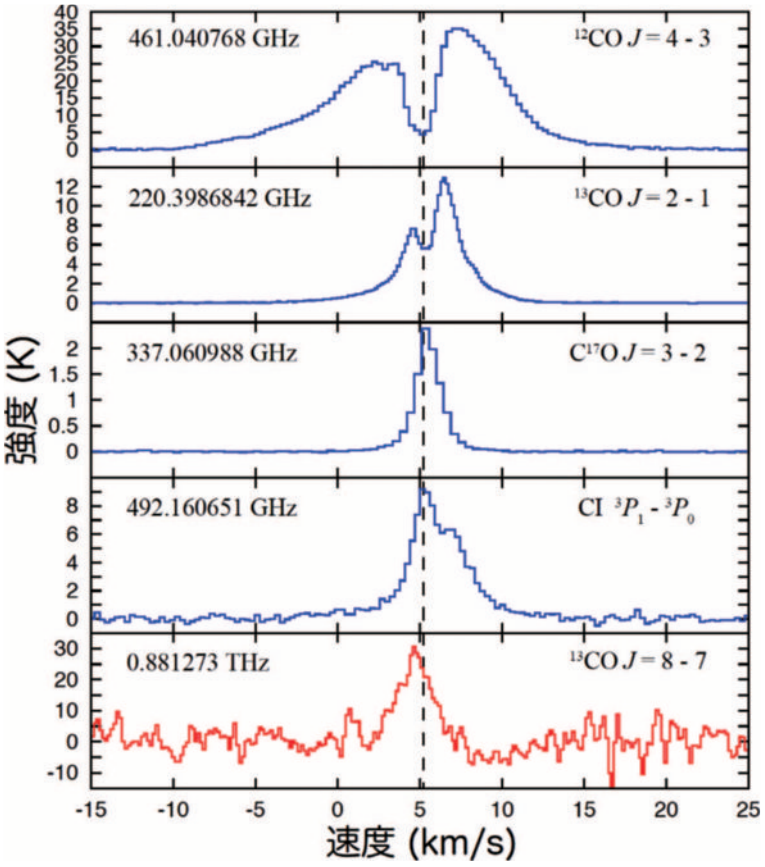


図 7：R CrA IRS7B の一酸化炭素及び炭素原子のスペクトル線．これらのスペクトルは，ASTE 望遠鏡（Watanabe et al., 2012）及びヨーロッパのグループが運用する APEX（Atacama Pathfinder Experiment）望遠鏡（Lindberg et al., 2015）により観測された．一番下の赤のスペクトル線がテラヘルツ受信機を使って観測した ^{13}CO（J=8–7）のスペクトル線である．

迫ることが可能性であるという，高励起線観測の意義を示すことができた．

3. 実験室における分子分光実験

3.1. 実験室分光の目的

星・惑星形成領域に対する電波観測においては，様々な分子の回転スペクトル線が検出される．電波望遠鏡によるスペクトル線観測における周波数精度は，観測周波数に対して 10^{-8} 程度以上であり，そのような高い精度は星・惑星系形成領域において分子を同定するために必須である．さらには，この高い周波数精度により，スペクトル線のドップラー効果を利用して，当該領域の速度構造という貴重な情報を得ることも可能となる．ALMA の登場により，ミリ波帯からテラヘルツ帯（0.1–0.9 THz）に至る領域で，様々な分子の回転スペクトル線がかつてない感度で観測できるようになった．その結果，分子の種類が同定できないスペクトル線（未同定線）が非常に多く検出され，さらにスペクトル線データベースにある静止周波数からずれたスペクトル線も多数検出されており，観測研究においてしばしば支障をきたしている．その原因の 1 つは，スペクトル線データベースは，限られた測定データのみを使い，分子スペクトルの理論に基づいた計算で予想した周波数をリストアップしており，必ずしも全てのスペクトル線が網羅されているわけではないからである．さらに，その周波数精度も，その測定方法（自然同位体比率での測定）や計算手法（高次の項の近似）などから，特に同位体種のスペクトル線や高励起スペクトル線を中心に不十分なケースが少なくない．

例えば，ホットコアと呼ばれる，飽和有機分子に恵まれた原始星まわりのガスを観測すると，図 8 のように非常に多くのスペクトル線が観測される．しかし，周波数帯によってはその半数以上が未同定，すなわち，データベースにないスペクトル線である．原始星まわりでは将来惑星系が形成されることを考えると，どのような物質が惑星系形成初期に存在していたのかを知ることは大変重要である．この未同定線には，未知の分子のみならず，既知の分子の同位体種や高励起スペクトル線などが混在していることが予想される．それらを切り分けるためには，まず既知の分子やその同位体種のスペクトル線を実験室において直接分光測定し，データベースを拡充していくことが有効である．

そこで，前章記載のテラヘルツ帯カートリッジ型を含め，電波天文学で使用されている様々な波長帯のカートリッジ型受信機をそのまま使用し，天体観測における宇宙背景放射と観測天体を，それぞれ液体窒素とガスセルに置換することで，様々な分子のスペクトル線の静止周波数を高い精度で測定する放射型分光計を開発した．

3.2. 分子分光装置 SUMIRE

上記の目的のために，理化学研究所において分子分光装置 SUIMRE（Spectrometer Using superconductor MIxer REceiver）を開発している（図 9）．この分光装置の最大の特徴は，ALMA や ASTE 望遠鏡などで実際に使用されている受信機や分光計の技術をそのまま実験室の実験に利用している点である．電波望遠鏡では星間空間に存在する分子雲を観測するが，この SUMIRE では分子雲の代わりに分子ガスをセルに封入し「観測」する．

セルに封入された分子ガスからは，分子の種類によっ

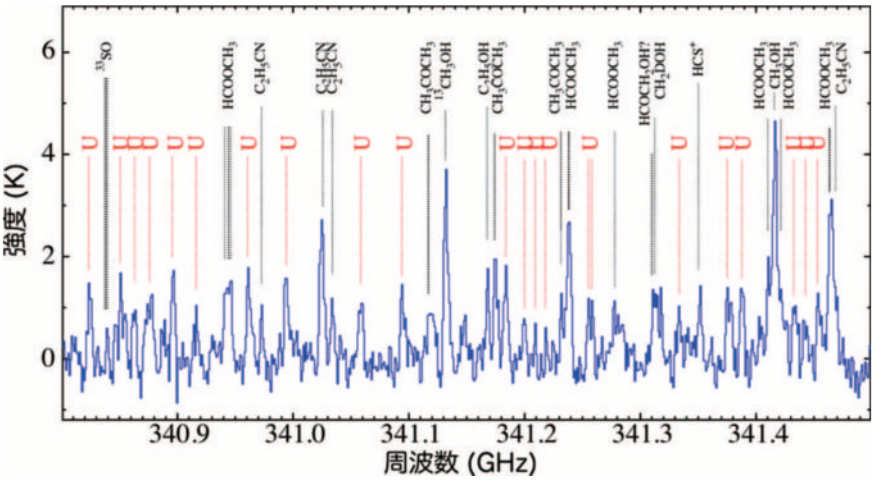


図 8：ALMA の観測により検出された，ホットコア NGC 2264 CMM3A のスペクトル線（Watanabe et al., 2017 の観測データをもとに図を作成）．赤字で U と示されているスペクトル線が未同定線である．

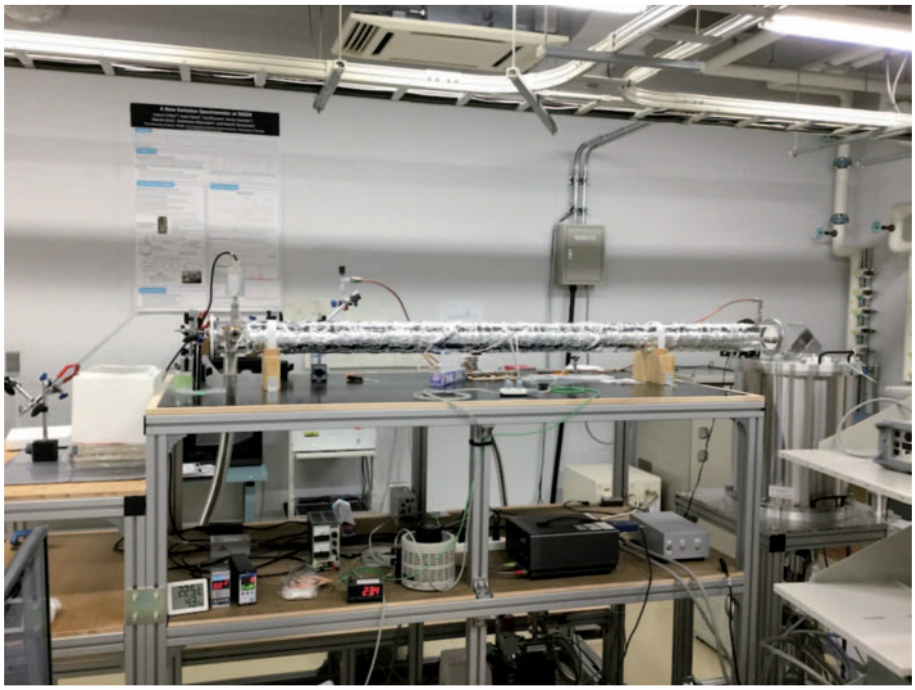


図 9：理化学研究所で開発中の分子分光装置 SUMIRE．中心の銀色の筒が分子ガスを封入するセルで，右側に受信機，左側に液体窒素の入った白い容器がある．

て特定の周波数の輝線が放射されている．SUMIRE はこの分子輝線を受信機で捉えるのだが，そのままでは検出することができない．なぜなら，ガスセルの周囲は室温（約 300 K）に相当する黒体放射が満ちており，分子から放射される輝線がそれに埋もれてしまうからである．そこで，ガスセルを挟んで受信機の反対側に液体窒素を使い 77 K に冷却した黒体を置き，背景の黒体放射の強度を下げることで分子輝線を検出する．これは 10 K 程度の低温の分子雲からの分子輝線が，3 K の宇宙マイクロ波背景放射を背景にすることで検出できることと全く同じことである．

この放射型の分子分光装置は，これまでの吸収型の装置と比較すると感度が落ちるという弱点があった．しかし，ALMA で使用する低雑音の受信機を利用することでその弱点を克服した．さらに，この受信機は同時に測定できる周波数帯域が 8 GHz と広いので，広帯域のスペクトル測定を同一の実験条件で行うことができるメリットがある．この広い周波数帯域を有効に利用するため，SUMIRE では同じく電波望遠鏡用に開発された帯域 2.5 GHz の広帯域デジタル分光計（XFFTS）を 4 台使用した．また，最近の技術により，同タイプの受信機で 38 GHz の帯域を同時測定できるものもある．SUMIRE では，ひとまず 8 GHz での測定を行っているが，XFFTS の分光モジュールのボードを追加することで，さらに広い範囲を一挙に測定することも可能である．広帯域同時測定の最大のメリットは，時間差によるガス圧の変化などに影響されることなく，同時に複数本のスペクトル線が測定できる点である．その結果，正確なスペクトル線の相対強度が得られるため，測定温度を変えて測定することで，スペクトル線の遷移のエネルギ上位（下位）準位エネルギーの情報も得ることが可能である．さらに，絶対強度も測定することができるため，ガスセルに封入されたガスの量とスペクトル線強度を比較して，測定結果の妥当性なども検証可能である．

3.3. SIS 素子を用いた 2 SB 受信機

SUMIRE では，ALMA で採用されているサイドバンド分離型の Superconductor-Insulator-Superconductor（SIS）受信機（2 SB 受信機）を使用している．この受信機で使用されている SIS 素子は厚さ 1 nm 程度の絶縁層を 2 つの超伝導体の電極で挟んだ構造をしており，電磁波が照射されることでトンネル効果により超伝導体の電極間を電流が流れる．SIS ミクサは，この現象を利用して受信信号と局部発振信号を混合する．通常，2 つの信号を混合して周波数変換をすると，局部信号を中心に上側の周波数（USB）と下側の周波数（LSB）が折り畳まれるように混ぜ合わされる．しかし，このままでは検出したスペクトル線が USB 側にあったのか LSB 側にあったのか見分けがつかない．そこで，この受信機では USB と LSB を分離するために，2 つの SIS ミキサと，受信信

号用の 90 度ハイブリッドカプラ，中間周波数用の 90 度ハイブリッドカプラを用いて USB と LSB の分離（サイドバンド分離）を実現している．この方式では，まず受信信号をそのまま SIS ミクサで周波数変換したものと，位相を 90 度変化させて周波数変換したものを用意する．その後，どちらかの信号の位相を 90 度変化させてもう一方と混合すると，USB 又は LSB のどちらか片方の位相が互いに 180 度変化した状態で混合される．その結果，位相が 180 度変化した側の信号が相殺されて，もう片側の信号のみが取り出されることでサイドバンド分離される．そのため，この受信機は USB と LSB の測定が同時にでき，効率のよい分光実験が可能である．また受信機の構造はカートリッジ型であり，カートリッジ受信機を交換することで様々な周波数帯を測定できる．さらに，ASTE 望遠鏡用受信機と全く同じカートリッジタイプのため，この受信機をそのまま ASTE 望遠鏡に搭載することも可能である．現在までに 200 GHz 帯のカートリッジ受信機を開発済みである．200 GHz 帯受信機の観測信号の周波数変換後の周波数帯域は 4 GHz〜8 GHz であり，直線偏波分離器により，2 偏波同時観測も可能である．今後，300〜500 GHz 帯のカートリッジ受信機も開発する予定である．

3.4. 200 GHz 帯における測定

現在，SUMIRE では 200 GHz 帯のカートリッジ受信機を使用した分光測定を進めている．図 10 は SUMIRE によるメタノール（CH_3OH）の測定で得られたスペクトル線である．下はセル内に封入したメタノールの量と温度と圧力をもとに計算したモデルのスペクトル線である．スペクトル線のパターンが強度も含めて非常によく一致しており，SUMIRE の強度測定の性能が十分であることを示している．さらに，測定から求めた周波数と既存の分子周波数のデータベース CDMS（The Cologne Database for Molecular Spectroscopy）（Müller et al., 2001, 2005）に記載されている周波数を比較した（図 11）．2 つの周波数もとてもよく一致しており，SUMIRE の周波数の決定精度も十分であることが示された．一方で，分子回転の準位エネルギーが高くなると，データベース

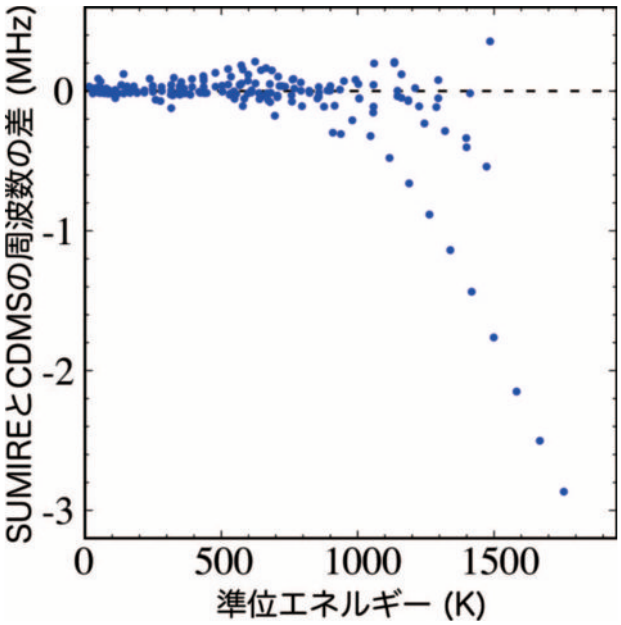


図 11：メタノールの SUMIRE の測定で得られた周波数と分子分光のデータベース CDMS（The Cologne Database for Molecular Spectroscopy）（Müller et al., 2001, 2005）に記載されている周波数の差と回転の準位エネルギーをプロットした図．

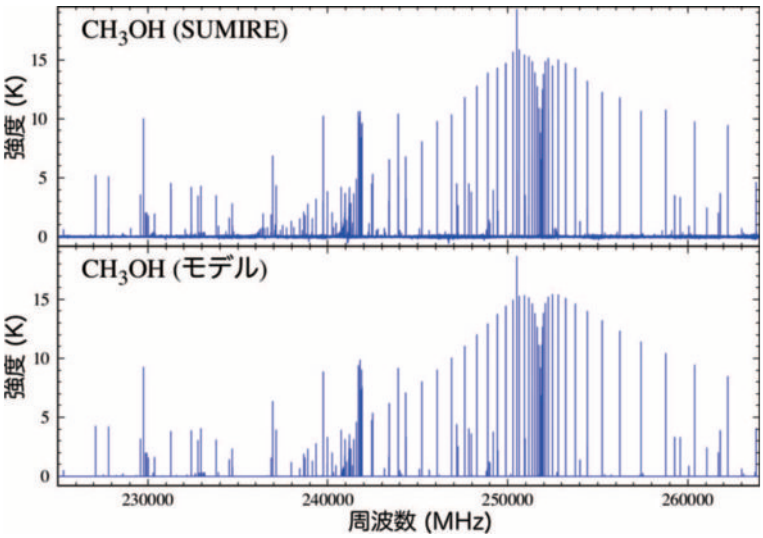


図 10：SUMIRE を使い測定したメタノール（CH_3OH）のスペクトル（上）と，メタノールの量と温度と圧力を実験と同じ条件にして計算したモデルのスペクトル線（下）．

の周波数と一致しない輝線も見られる．これは，データベースの値が少数の測定を量子力学的に解析して得られた分子パラメータに基いで計算したものだからである．特に高いエネルギー準位では，分子の回転状態を正確に予測するためには分子のハミルトニアンにおいてより高次の振動回転相互作用を考慮する必要があり，それが不十分であることを示している．

また図 12 はジメチルエーテル（CH_3OCH_3）の測定によるスペクトルと，モデルのスペクトルである．このジメチルエーテルのスペクトル線には，データベースには記載されていない数多くの輝線が見られた．その理由は，この分子について実験から求められている分子パラメータの精度が十分でなく，低いエネルギー準位のスペクトル線しかデータベースに記載されていないためだと考えられる．特にジメチルエーテルは，酸素原子を挟んで両側に回転や振動するメチル基が結合しており，分子は非常に複雑な振動回転相互作用を呈する．その結果，全ての状態を網羅した分子パラメータの決定が為されていない．このように，この実験の強みは分子パラメータが十分な精度で求められていない場合でも，すべての輝線の周波数を正確に測ることができる点にある．

3.5. 今後の測定と開発

ALMA の観測では数多くの未同定線が検出されているが，その多くはジメチルエーテルのような「既知」の分子の輝線と考えられる．この既知の分子のスペクトルを未同定線から取り除くことで，その中から星間空間では未発見の分子を特定することがより容易になる．また，既存のデータベース内にある既知のスペクトル線であっても，その精度が不十分な場合，ドップラー効果を利用して分子ガスの星間空間での運動を捉えることや，分布の情報を得ることが困難となる．そのため，静止周波数の精密測定は，未同定線のみならず，観測された様々なスペクトル線が持つ情報を最大限利用するために，非常に重要な試みであると言える．

このために，SUMIRE を使い，星間分子として知られている有機分子やその同位体種の周波数を測定し，測定に基づくデーターベースを構築する．これは，随時公開し，天文学研究者のみならず，分子分光研究者の利用にも供する予定である．SUMIRE は ALMA タイプのカートリッジ受信機を採用しているため，受信機の取り替えが非常に簡単である．現在，ALMA Band 7 と Band 8 を合わせた受信機を開発中であり，完成すれば 300 GHz から 500 GHz まで測定できるようになる．最終的には，ALMA で観測可能な周波数帯全てを観測できるように拡張する予定である．さらに，前述の ASTE に搭載したテラヘルツ帯の受信機も搭載し，テラヘルツ帯の分子分光も行う予定である．これらのデータは，ALMA による観測結果の解析に大きな役割を果たすと期待される．

4. さいごに

以上のように，ALMA など高感度の観測装置によって，近年，新たな分子輝線観測成果が次々と報告されている．一方，それらを理解する上で，スペクトル線データベースや既存の分子分光測定の情報が不十分であることも明らかになってきた．特にエネルギー準位の高い高

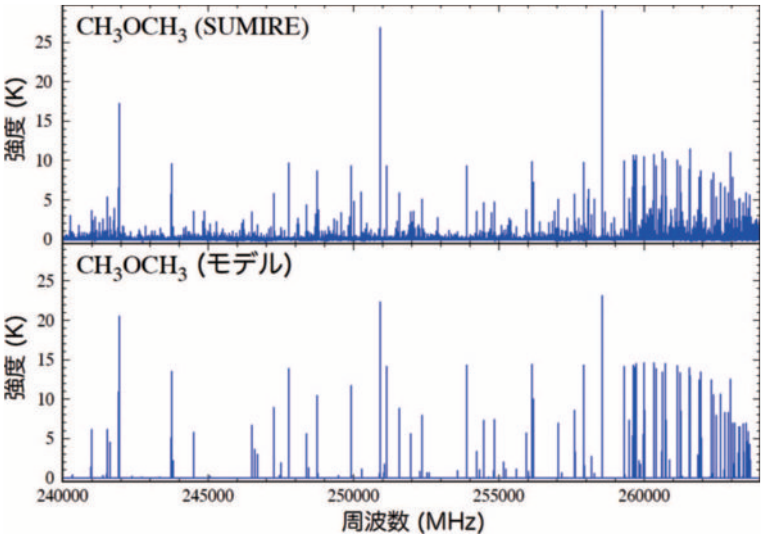


図 12：SUMIRE を使い測定したジメチルエーテル（CH_3OCH_3）のスペクトル（上）と，ジメチルエーテルの量と温度と圧力を実験と同じ条件で計算したモデルのスペクトル線（下）．

励起のスペクトル線では，データベースと観測のずれが大きくなる傾向がある．この高励起のスペクトル線の多くは高い周波数帯に存在するため，今後はテラヘルツ帯での実験室分光測定も重要となると考えられる．

SUMIRE は ALMA タイプのカートリッジ受信機を採用しており，受信機の取り替えが非常に簡単である．最終的には，ALMA で観測可能な周波数帯全てを観測できるように受信機を拡張し，さらに，前述の ASTE に搭載したテラヘルツ帯の受信機も搭載することも予定している．既にテラヘルツ帯の受信機の SUMIRE への搭載試験を実施し，スペクトル線取得に成功している．しかし，テラヘルツ帯では装置内での反射や大気吸収効果など，ミリ波サブミリ波帯での測定とは異なる難しさも見えてきた．今後，これらの様々な効果の影響を取り除きつつ，丁寧な開発を行っていきたい．

1970–80 年代の星間分子の発見ラッシュがあった際には，分子分光学と天文学が協働してスペクトル線の同定に挑んできた．そして現在，目的はドップラー効果による分子ガスの運動の測定や高励起スペクトル線の同定など新たになったものの，再び分子分光学と天文学が協働して研究することが必要となりつつある．本研究をきっかけとして，そのような研究が進むことを期待したい．それにより，天文学のみならず，分子分光学としても，テラヘルツ帯での分光測定による新たな成果が期待される．

謝辞

ASTE 望遠鏡でのテラヘルツ実験では，文部科学省科学研究費　新学術領域研究（25108005），JSPS 科学研究費基盤研究（S）（21224002）からの支援を受けています．また，東京大学山本研究室の山本智教授をはじめ，椎野竜哉氏，古屋隆太氏，相馬達也氏，西村優里氏，猪熊宏士氏，海老澤勇治氏，吉田健人氏，Ana Lopez Sepulcre 氏，大口脩氏に，受信機の開発から現地での実験のすべてにおいて多大な協力をいただきました．国立天文台チリ観測所には ASTE 望遠鏡をお貸しいただき，同観測所スタッフの皆様にはテラヘルツ実験の準備および現地での運用において多大な協力をいただきました．SUMIRE 開発は，文部科学省科学研究費　新学術領域研究（25108005），JSPS 科学研究費基盤研究（S）（18H05441），および理化学研究所　新領域開拓課題からの支援を受けています．SUMIRE の分光実験では，東京大学山本研究室の山本智教授をはじめ，千葉雄太郎氏，竹ヶ原諒貴氏，理化学研究所の玉内朱美氏，電気通信大学の佐藤龍彦氏に多大な協力をいただきました．SUMIRE 搭載の受信機開発では国立天文台の鵜澤佳徳氏，Alvaro Gonzalez Garci 氏，小嶋崇文氏に多大なご協力いただきました．

参考文献

de Graauw, Th. et al. (2010), The Herschel-Heterodyne Instrument for the Far-Infrared (HIFI). *Astronomy and Astrophysics*, **518**, L6.

De Luca, M. et al. (2012), Herschel/HIFI Discovery of HCl^+ in the Interstellar Medium. *The Astrophysical Journal Letters*, **751**, L37.

Lis, D. C. et al. (2010), Herschel/HIFI discovery of interstellar chloronium (H_2Cl^+). *Astronomy and Astrophysics*, **521**, L9.

Müller, H. S. P. et al. (2001), The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS. *Astronomy and Astrophysics*, **370**, L49–L52.

Müller, H. S. P. et al. (2005), The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS: a useful tool for astronomers and spectroscopists. *Journal of Molecular Structure*, **742**, 215–227.

Ossenkopf, V. et al. (2010), Detection of interstellar oxidaniumyl: Abundant H_2O^+ towards the star-forming regions DR21, Sgr B2, and NGC6334. *Astronomy and Astrophysics*, **518**, L111.

Pilbratt, G. L. et al. (2010), Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy. *Astronomy and Astrophysics*, **518**, L1.

Schilke, P. et al. (2014), Ubiquitous argonium (ArH^+) in the diffuse interstellar medium: A molecular tracer of almost purely atomic gas. *Astronomy and Astrophysics*, **566**, A29.

Siegel, P. H. (2002), Terahertz technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **50**, 910–928.

Tanarro, I. et al. (2019), Using radio astronomical receivers for molecular spectroscopic characterization in astrochemical laboratory simulations: A proof of concept. *Astronomy and Astrophysics*, **609**, A15

Yamamoto, S. (2017), *Introduction to Astrochemistry: Chemical Evolution from Interstellar Clouds to Star and Planet Formation, Astronomy and Astrophysics Library*, Springer Japan, Tokyo.

Watanabe, Y. et al. (2017), Discovery of Striking Difference of Molecular-emission-line Richness in the Potential Proto-binary System NGC 2264 CMM3. *The Astrophysical Journal*, **847**, 108.

Wehres, N. et al. (2018), A laboratory heterodyne emission spectrometer at submillimeter wavelengths. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **20**, 5530–5544.