



日蘭共同開発の新型超伝導受信機 DESHIMA が拓く、電波天文学の新航路

デルフト工科大学と国立天文台、名古屋大学、東京大学、北海道大学、埼玉大学は、国際協力で開催された新しい電波受信機で得られた研究成果について、次のとおりウェブサイトでの発表を行いました。

○発表者:遠藤 光(デルフト工科大学 助教)

田村 陽一(名古屋大学大学院理学研究科准教授)

河野 孝太郎(東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター教授)

香内 晃(北海道大学低温科学研究所教授)

成瀬 雅人(埼玉大学大学院理工学研究科助教)

○発表機関:デルフト工科大学、自然科学研究機構国立天文台、東京大学大学院理学系研究科、名古屋大学、北海道大学、埼玉大学

○国立天文台 アステ望遠鏡 <https://alma.mtk.nao.ac.jp/aste/>

国立天文台 <https://www.nao.ac.jp/>

【概要】

デルフト工科大学(オランダ)の遠藤光(えんどうあきら)助教と名古屋大学の田村陽一准教授、東京大学の河野孝太郎教授らの国際研究チームは、最先端の超伝導技術を駆使して全く新しい仕組みの電波受信機 DESHIMA を開発し、それを国立天文台がチリ共和国で運用するアステ望遠

鏡に搭載することにより、天体からの電波観測に成功しました。DESHIMA は、非常に広い周波数帯域の電波を一度に受信しながら、これを分光することができるのが大きな特徴で、従来の電波受信機ではこの両立は大変困難でした。DESHIMA を使った今回の試験観測では、遠方にある銀河までの距離を効率よく計測することができることが実証されたほか、オリオン大星雲に含まれる分子の種類と分布を明らかにできる高い能力も確認されました。DESHIMA が実証に成功した世界初の技術を応用して本格的な電波分光撮像カメラを開発することで、遠方銀河研究から天の川銀河内の星形成領域研究に至るさまざまな分野において、新たな研究が花開くことが期待できます。

この観測成果は、A. Endo et al. “First light demonstration of the integrated superconducting spectrometer”として、2019年8月6日発行の天文学専門誌「ネイチャー・アストロノミー」に掲載されました。



アステ望遠鏡に搭載された DESHIMA（左の円筒形のものが、DESHIMAが入った真空冷凍容器）と開発チーム。後列左から木挽俊彦、大島泰（国立天文台）、唐津謙一（デルフト工科大学）、中央が遠藤光（デルフト工科大学）、その右が竹腰達哉（東京大学/電気通信大学）、前列左から David Thoen、Robert Huiting（デルフト工科大学） Credit: Robert Huiting（オランダ宇宙研究所）

【DESHIMA の概要】

DESHIMA は、オランダのデルフト工科大学・オランダ宇宙研究所 SRON・ライデン大学と、東京大学・国立天文台・名古屋大学・北海道大学・埼玉大学をはじめとする日本の研究チームが共同で開発した電波観測装置です。DESHIMA という名前は Deep Spectroscopic High-redshift Mapper の略称ですが、江戸時代にオランダと日本の交流の窓口であった長崎県の出島にもちなんでいます。

DESHIMA の特徴は、これまでの電波観測装置に比べて圧倒的に広い周波数帯の電波を一度に観測し、しかも、その電波を複数の周波数帯に分けて（分光）それぞれの強度を測定できることです。DESHIMA が一度に観測できる周波数幅（332~377 GHz）は、アルマ望遠鏡に搭載されている受信機が一度に観測できる周波数幅の 5 倍以上にも相当します。広い周波数帯域と中程度の分光性能（周波数分解能）を持つ DESHIMA は、狭い周波数帯域を高い周波数分解能で分光する従来の受信機と相補的な役割を果たし、多様な電波天文観測を実現することが期待されています。

【広帯域分光観測の意義】

広い周波数帯の電波を一度に分光する能力は、何億光年もの彼方にある銀河の距離を効率よく測定するために重要です。宇宙は膨張しているため、遠くの天体からやってくる電磁波は、地球に届くまでの間に宇宙膨張によって、その波長が引き伸ばされます。この波長の伸び（周波数の低下）を、赤方偏移と呼びます。赤方偏移を測定することで、電磁波を發した天体までの距離を測定することができます。銀河の距離をもとに作られる宇宙の 3 次元地図は、宇宙の成り立ちや銀河の進化を探る重要な手がかりになります。

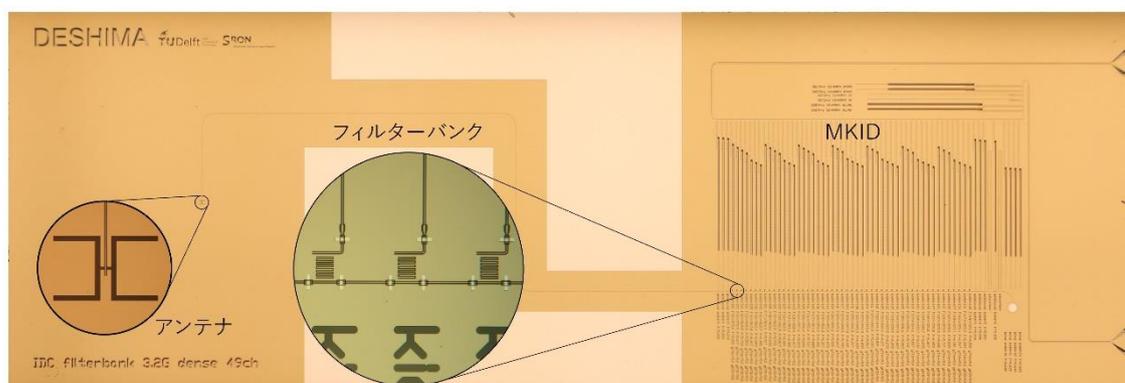
ただし、ひとつの分子・原子からの特定の電磁波だけを観測したのでは、赤方偏移を測ることができません。もともとどの周波数の電波だったのかがわからないためです。これを解決するには、複数の分子・原子からの電磁波を捉える必要があります。また、可視光赤外線撮像観測で測定された大まかな赤方偏移の精度を上げたい場合、可視光赤外線観測で求められた赤方偏移の誤差範囲をしらみつぶしに観測しなければなりません。そのためには、幅広い周波数帯域の電波を観測することが重要になりますが、一度に観測できる周波数帯域が狭い従来の受信機では、必要な周波数帯域をカバーするには少しずつ周波数を変えながら観測を繰り返す必要があるため、完了までに長い時間が必要でした。

【DESHIMA の技術】

一度に幅広い周波数帯の電波を分光観測することができる DESHIMA は、従来の電波受信機の課題を克服した画期的な電波受信機であり、その実現には、独創的なアイデアとそれを実現するナノテクノロジーが必要不可欠でした。DESHIMA のカギになる技術は、電波を波長ごとに分ける「フィルターバンク」と、電波を超高感度で受信する MKID (Microwave Kinetic Inductance Detectors) です。DESHIMA は、これらの技術を組み合わせた世界初の観測装置です。

フィルターバンクは、電波を周波数ごとに分ける装置として古くから電波望遠鏡に使われてきました。DESHIMA では、このフィルターバンクを電子回路上に構築することで、圧倒的な小型化に成功しました。電子回路はマイナス 273℃（絶対温度 0.12 ケルビン）まで冷却され、超伝導状態になった窒化ニオブチタンの配線内を電波が通ります。その通り道に隣り合うようにいくつも並んだつづら折りの配線が、電波の周波数を選ぶフィルターの役割を果たし、電波は周波数ごとに枝分かれして回路の中を進みます。いわば、運送会社のベルトコンベアで配送先ごとに荷物が仕分けされているようなイメージです。

周波数ごとに仕分けされた電波を待っているのは、MKID と呼ばれる検出素子です。MKID は極めて微弱な電磁波を高い感度で捉えることができる超伝導素子で、電波の中でも特に波長の短いサブミリ波や遠赤外線を検出する次世代の観測装置において重要な役割を果たすと期待されています。



DESHIMA チップの顕微鏡画像。電波望遠鏡を構成するパラボラアンテナで集められた電波は、左のアンテナから電子回路に入り、細長い回路を伝って右側に流れていきます。その先にはフィルターバンクがいくつも並んでいて、それぞれ特定の周波数の電波だけを取り出します。取り出された電波は写真上方に進み、MKID でその強度が測定されます。チップの大きさは、4cm × 1.5cm です。 Credit: デルフト工科大学

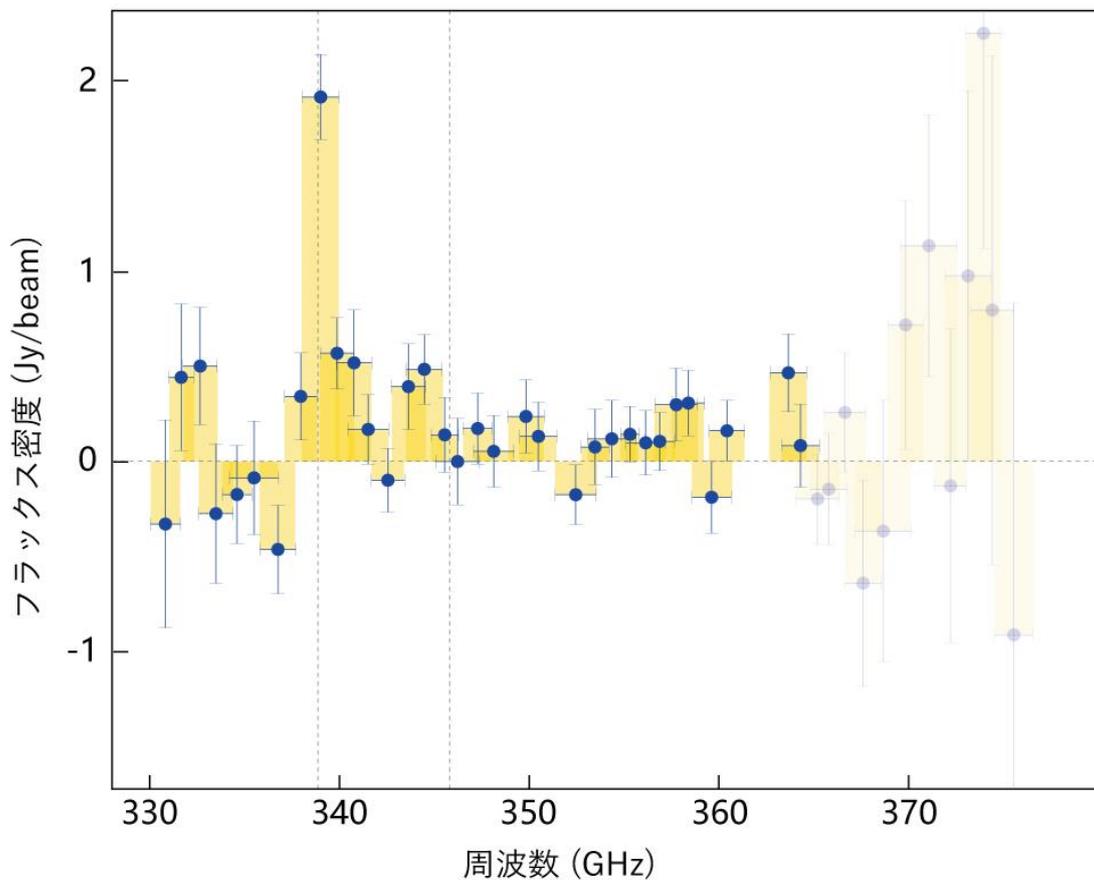
【DESHIMA による試験観測結果】

DESHIMA は、チリ共和国のアタカマ高地（標高 4860m）に設置された国立天文台のアステ望遠鏡（口径 10m）に搭載され、2017 年 10 月から 11 月にかけて、初めての試験観測が行われました。この試験にいたるまでには、DESHIMA の搭載や光学系の調整、超伝導素子の冷却、信号処理やデータ解析法など、国立天文台の大島泰助教、東京大学の竹腰達哉特任助教、名古屋大学の谷口暁星研究員らが蓄積した技術的ノウハウが活かされました。

今回の試験観測では、地球からの距離およそ 2.9 億光年にある銀河 VV 114 が観測対象に選ばれました。観測の結果、周波数およそ 340 GHz に一酸化炭素分子が放つ電波が検出されました。この銀河は既に過去の観測で赤方偏移が測定されており、DESHIMA でも確かに同じ周波数に電波が検出されたことで、DESHIMA の技術が実際に天体までの距離測定に使えるこ

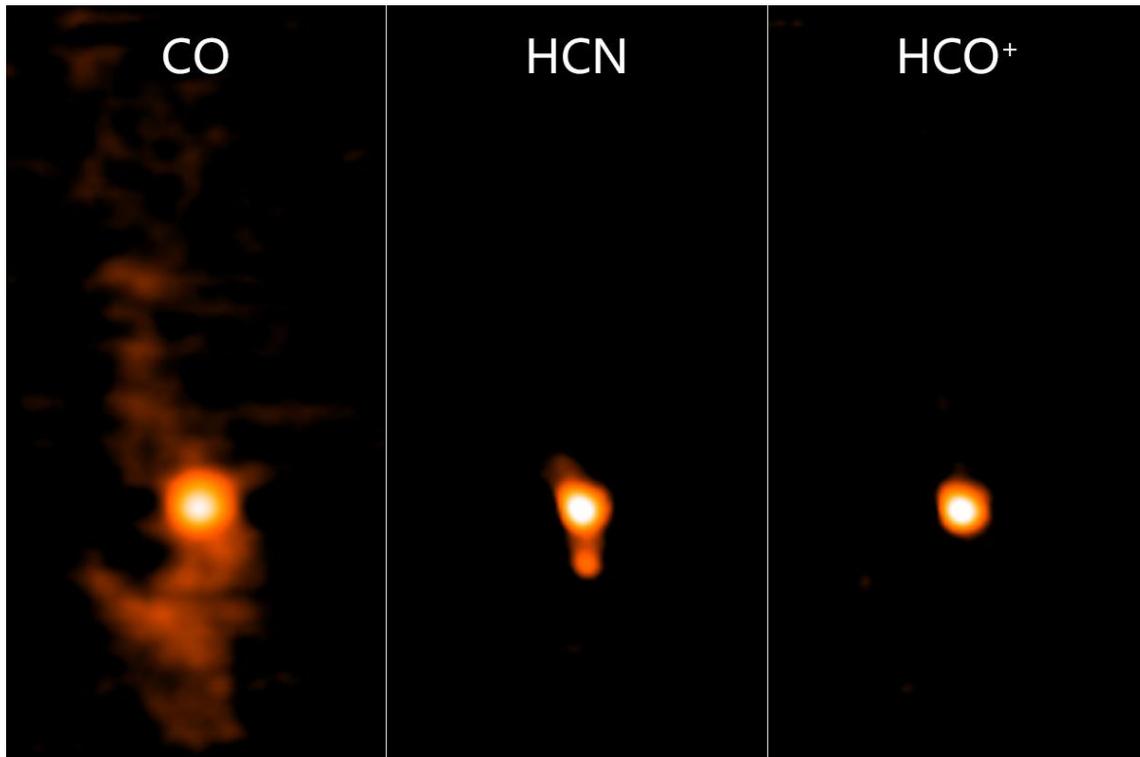
とが実証されました。

さらに、オリオン大星雲の観測も行われました。オリオン大星雲では多様な分子からの電波がすでに検出されていますが、DESHIMA は一度に3つの分子（一酸化炭素 CO、ホルミルイオン HCO^+ 、シアン化水素 HCN）からの電波を検出することに成功しました。またオリオン大星雲は大きく広がっている天体ですが、望遠鏡全体を振って空をスキャンすることで、星雲内の分子の分布も同時に描き出すことができました。DESHIMA の広帯域分光能力が実証された観測結果といえます。



図：DESHIMA が観測した活動銀河 VV 114 のスペクトル。一酸化炭素分子が放つ電波が 339GHz に現れています。一酸化炭素が出す電波はもともと 345GHz であり、宇宙の膨張による赤方偏移で周波数のずれが生じます。このずれから、VV114 までの距離を求めることができます。

Credit: DESHIMA Project Team/Endo et al.



図：DESHIMA が観測した、オリオン大星雲周辺の一酸化炭素 (CO)、シアン化水素 (HCN)、ホルミルイオン (HCO⁺) の分布。可視光で見えるオリオン大星雲は中央下部にあり、3つの分子がともに強く電波を出しています。一酸化炭素は、オリオン大星雲から南北に大きく広がっているようすがわかります。 Credit: DESHIMA Project Team/Endo et al.

【DESHIMA の今後】

DESHIMA 開発チームでは、今回の初観測の成功を受けて、さらなる性能の向上を目指しています。感度の向上や周波数帯の拡大に加え、現在の 1 画素から 16 画素の電波分光撮像カメラに拡張することも検討されており、実現すれば宇宙の 3 次元地図をより効率的に作り上げることができるでしょう。宇宙初期の銀河ではどのように星ができていたのか、銀河がどのように成長してきたのか、こうした謎に立ち向かう強力な道具として、DESHIMA は大きな期待を受けています。

【論文・研究チーム】

この観測成果は、A. Endo et al. “First light demonstration of the integrated superconducting spectrometer” として、2019 年 8 月 6 日発行の天文学専門誌「ネイチャー・アストロノミー」に掲載されました。

この研究を行った研究チームのメンバーは、以下のとおりです。
 遠藤光 (デルフト工科大学)、唐津謙一 (デルフト工科大学/オランダ宇宙研究所)、田村陽一 (名古屋大学)、大島泰 (国立天文台/総合研究大学院大学)、谷口暁星 (名古屋大学)、竹

腰達哉 (東京大学/電気通信大学)、浅山信一郎 (国立天文台)、Tom J. L. C. Bakx (名古屋大学/国立天文台/カーディフ大学)、Sjoerd Bosma (デルフト工科大学)、Juan Bueno (オランダ宇宙研究所)、Kah Wuy Chin (国立天文台/東京大学)、藤井泰範 (国立天文台)、藤田和之 (北海道大学)、Robert Huiting (オランダ宇宙研究所)、五十嵐創 (デルフト工科大学)、石田剛 (東京大学)、石井峻 (国立天文台/合同アルマ観測所)、川邊良平 (国立天文台/総合研究大学院大学/東京大学) Teun M. Klapwijk (デルフト工科大学/Moscow State Pedagogical University)、河野孝太郎 (東京大学)、香内晃 (北海道大学)、Nuria Llombart (デルフト工科大学)、前川淳 (国立天文台)、Vignesh Murugesan (オランダ宇宙研究所)、中坪俊一 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)、成瀬雅人 (埼玉大学)、大田原一成 (国立天文台)、Alejandro Pascual Laguna (オランダ宇宙研究所/デルフト工科大学)、鈴木惇也 (高エネルギー加速器研究機構)、鈴木向陽 (名古屋大学)、David J. Thoen (デルフト工科大学)、塚越崇 (国立天文台)、上田哲太郎 (名古屋大学)、Pieter J. de Visser (オランダ宇宙研究所)、Paul P. van der Werf (ライデン大学)、Stephen J. C. Yates (オランダ宇宙研究所)、吉村勇紀 (東京大学)、Ozan Yurduseven (デルフト工科大学)、Jochem J. A. Baselmans (オランダ宇宙研究所/デルフト工科大学)

この研究は、以下の支援を受けています。

Netherlands Organization for Scientific Research NWO (Vidi grant No. 639.042.423, NWO Medium Investment grant No. 614.061.611 DESHIMA), the European Research Council ERC (ERC-CoG-2014 - Proposal no 648135 MOSAIC), 日本学術振興会科学研究費補助金 (JP25247019, JP17H06130)、日本学術振興会頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム (No. R2804)、北海道大学低温科学研究所、国立天文台 ALMA 共同科学研究事業 2018-09B、NWO (Veni Grant 639.041.750)、ERC Advanced Grant No. 339306 (ME605 TIQUM)、the Russian Science Foundation (Grant No. 17-72-30036)、ERC (Starting Grant No. 639749)、the European Unions Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 730562 (RadioNet)、the European Union Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013, FP7/2007-2011) under grant agreement No. 607254.