

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247019

研究課題名(和文) 超伝導共振器を使ったオンチップ型低分散超広帯域サブミリ波分光計の実証

研究課題名(英文) Demonstration of on-chip low-dispersion ultra-wideband spectrograph for submm wavelengths using super-conducting resonators

研究代表者

河野 孝太郎 (Kohno, Kotaro)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：80321587

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,300,000円

研究成果の概要(和文)：ミリ波サブミリ波帯において、比較的低い分光解像度ながら、ヘテロダイン受信機と比較して格段に広い分光帯域の実現を目指した新しいコンセプトの分光システム DESHIMA の技術実証機の開発を行った。実験室における評価を経て、南米チリ・アタカマ砂漠において運用中のサブミリ波望遠鏡ASTEに DESHIMA技術実証機を搭載し、オリオン分子雲や系外銀河NGC253など複数の天体から信号を受信することに成功した。観測周波数帯域は約330-370GHz、分光点数は49チャンネルであった。世界に先駆けてon-chip型超広帯域サブミリ波分光システムの天体信号を使った技術実証を行うことができた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a technology demonstration model of DESHIMA, a new concept spectrograph for the millimeter to submillimeter wave bands. It aims at realizing an ultra-wide instantaneous bandwidth that is remarkably wider than that of heterodyne receivers while having a relatively low spectral resolution. After evaluating in the laboratory, the DESHIMA technology demonstration model was mounted on the submillimeter-wave telescope ASTE operating in the Atacama desert in Chile, and we successfully detected the first astronomical signals from the Orion Molecular Cloud, NGC 253, and so on. The observing instantaneous bandwidth was about 330-370 GHz with 49 spectroscopic channels. We were able to demonstrate the technology of on-chip ultra-wideband submillimeter-wave spectrograph ahead of the world by receiving astronomical signals.

研究分野：電波天文学

キーワード：超伝導 銀河形成・進化 ダスト ミリ波サブミリ波 MKID

1. 研究開始当初の背景

宇宙における星形成の歴史を紐解くことは、星の中で生成される元素・物質の変遷を知り、さらに星形成を支配する要因の一つである暗黒物質の性質を理解する上でも極めて重要である。これまで、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などによる可視光から近赤外線に至る波長域（静止系では紫外線域）での観測が盛んに行われ、今や銀河の観測対象は赤方偏移 10 を超える時代となった。一方、Spitzer 衛星やあかり衛星、Herschel 衛星など、赤外線の観測から、静止系紫外線での測定で見えているのは、宇宙の星形成の一部であり、現在の宇宙から、赤方偏移 1~2 の時代に遡るにつれて、ダストに覆い隠されて、静止系紫外線の観測では見逃されている星形成活動が急激に増えていることも明らかになってきている。こうした状況を踏まえ、赤方偏移 2 より先の時代における、ダストに隠された星形成活動をいかに明らかにするかが大きな課題となっている。

我々は、初期宇宙においてダストに隠された爆発的な星形成銀河を探索する上で決定打となるミリ波サブミリ波帯での広域・高感度な観測を、南米チリ・アタカマ砂漠に設置・運用されている口径 10m のサブミリ波望遠鏡 ASTE など駆使し大規模に推進してきた。また、Herschel 衛星や SPT 望遠鏡、APEX 望遠鏡などの広域観測も進んできた。その結果、従来の理論的予測を越えて、赤方偏移 4 あるいはそれ以上という初期の宇宙に、ダストに隠された、極めて激しい爆発的な星形成銀河が、多数存在するらしいという事実が明らかになりつつある。よりサンプルを拡大し、統計的信頼性の高い議論を行うため、ダストに隠された爆発的な星形成銀河の分光赤方偏移測定を拡大していくことが急務である。

ところが、これらダストに覆われた遠方銀河の多くは可視光～近赤外線で非常に暗く、すばる望遠鏡等で分光赤方偏移を測定することは困難である。ミリ波サブミリ波帯で赤方偏移を測定することが求められるが、この波長帯で一般的に用いられるヘテロダイン受信機技術では（比較的狭い周波数域での超高分散分光は得意であるが）赤方偏移測定に適した「低分散でよいので超広帯域を分光するシステム」は難しい。また、低分散・超広帯域分光システムとして提唱・開発された Z-Spec や ZEUS が稼働を開始しているが、分散光学系が物理的に巨大であり、開発コストの上昇や、拡張性の困難（空間方向に複数の画素を持つことがほぼ不可能）という問題があった。

2. 研究の目的

この状況を打破するため、新しい超伝導共振器回路技術を駆使した、On-Chip 型の次世代超広帯域サブミリ波分光計 DESHIMA の開発を行い、その技術実証機をサブミリ波望

遠鏡 ASTE に搭載して、概念や性能を実証する。既存のミリ波サブミリ波帯分光システムの常識を打破する On-Chip 型の概念や性能を天体信号の観測（高赤方偏移天体に限らない）により示すことが本研究の目標である。このため、機能は最小限のものに限定し、空間方向は 1 画素のみ、かつ、周波数範囲も 350 GHz 帯（ないし 650 GHz 帯；開発状況による）の 1 バンドのみとする。

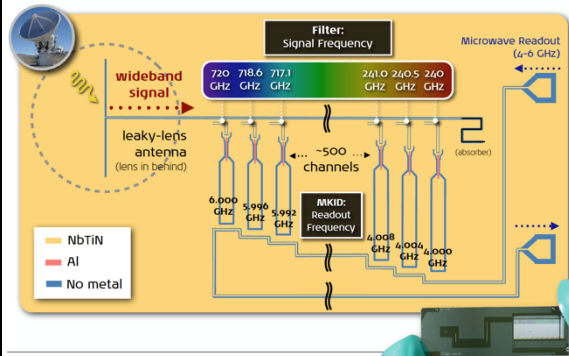


図 1：On-Chip 型超広帯域分光システム DESHIMA の概念図と実際に開発された超伝導 Chip（右下の写真。指で挟むことができるほど小さい）。サブミリ波望遠鏡で集められた信号は、広帯域アンテナを介して伝送線路へと導かれる。その先に、少しずつ共振周波数をずらして配置された超伝導共振回路が並べられており、対応する信号がマイクロ波帯（4-6 GHz 帯）の信号として読み出される。

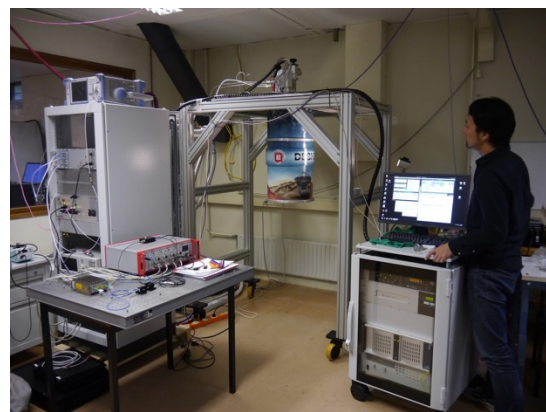


図 2：共同研究を行っているデルフト工科大学の実験室にて開発された DESHIMA デュワー（写真中央のフレームに固定されている青い円筒）と、読み出し回路一式（左側のラック部）を組み合わせた評価試験の様子。

3. 研究の方法

以下の 2 つの開発を行う。

- (1) 実証機の開発：まず、1 画素かつ 1 周波数バンドに絞り、On-Chip 型超伝導の概念を実証する。超伝導検出器としては Microwave Kinetic Inductance Device (MKID) を用いる。これにより、少しずつ共振周波数が異なる超伝導共振回路を

chip 上に配した分光器を実現する(図1)。設計周波数は、350 GHz 帯か 650 GHz 帯が候補であり、それぞれ得失があるため、この2つの周波数で素子開発を進める。実験室評価を行い(図2)、観測に耐える性能が出た周波数の分光器を実証機に載せ、ASTE への搭載・実証試験観測に進む。

- (2) ASTE 搭載のための光学系とインターフェースの開発：望遠鏡にあわせた光学系部分、制御系、データ取得系、およびデータ解析系の構築を行う。

4. 研究成果

得られた成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 技術実証機用 On-Chip 型超伝導分光器の制作・評価を行い、324-362 GHz の帯域を 49 チャンネルで分光できることを実証した。分光解像度($R = \lambda/\Delta\lambda$)は 300 ± 50 を達成した(図3)。
- (2) 技術実証機をサブミリ波望遠鏡 ASTE に搭載し(図4)、オリオン分子雲をはじめとする天体からの信号を実際に検出することに成功した。これにより、On-Chip 型の超伝導フィルターバンクを使った超広帯域サブミリ波分光システムというコンセプトを、天体信号の観測を通して実証することに成功した。

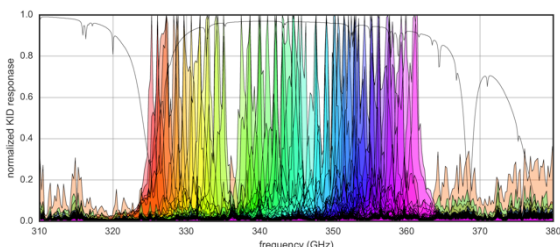


図3：実験室で測定された、On-Chip 型超伝導分光システム技術実証機の分光特性。横軸は周波数、縦軸は分光器の感度(相対値)である。約 40GHz 幅を 49 チャンネルに分光できることを示すことができた。観測周波数帯域は、地球大気の透過度(細い灰色の実線)を考慮して「大気の窓」を適切にカバーするように調整される。

観測手法やデータ解析の手法についても、これからさらに検討・開発すべき項目は多数あるが、世界に先駆けて、On-Chip 型超広帯域サブミリ波分光システムの天体信号を使った実証に成功したことは大きな成果である。観測を実施した天体には、高赤方偏移銀河も含まれており、技術実証はもちろん、新たな天文学的知見も得るべく、取得できた膨大な観測データの解析を進めていく予定である。今回の成果を基盤として、さらに一桁広い周波数範囲を一挙に分光できるシステムや、空間的に複数の分光チャンネルを配してアレイ化したシステムの実現も、いよいよ視野に捉

えることができた。

こうした開発的研究成果に加え、DESHIMA の科学目標である宇宙星形成史の変遷とその原因に少しでも迫るべく、ASTE や ALMA を駆使した観測的研究も進めた。ASTE によるサーベイでは、将来、DESHIMA を使った分光観測の良いターゲットとなる天体候補を増やすことができた。また、ALMA では、重力レンズ銀河団において CO/[CII]輝線銀河の光度関数への新しい制限を得たり、高赤方偏移原始銀河団において17個もの CO 輝線銀河の集団を一挙に検出するなど(<https://alma-telescope.jp/news/press/z146-201708>) DESHIMA をさらに広帯域化・多画素化することへの動機をさらに高めるような科学成果を数多く挙げる事ができた。



図4：サブミリ波望遠鏡 ASTE の受信機室内に搭載された DESHIMA デュワー。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 27 件)

以下全て査読有り

- ① Ando, R., Nakanishi, K., Kohno, K., (3 番目, 他 13 名), Diverse Nuclear Star-forming Activities in the Heart of NGC 253 Resolved with 10-pc-scale ALMA Images, The Astrophysical Journal, 849, id. 81 (11pp) (2017) 10.3847/1538-4357/aa8fd4
- ② Izumi, T., Kohno, K. (2 番目, 他 16 名), On the Disappearance of a Cold Molecular Torus around the Low-luminosity Active Galactic Nucleus of NGC 1097, The Astrophysical Journal, 845, L5 (7pp) (2017) 10.3847/2041-8213/aa808f
- ③ Yamaguchi, Y., Kohno, K. (2 番目, 他 11 名), Blind Millimeter Line Emitter Search using ALMA Data Toward Gravitational

- Lensing Clusters, *The Astrophysical Journal*, 845, id. 108 (10pp) (2017)
10.3847/1538-4357/aa80e0
- ④ Lee, M., Tanaka, I., Kawabe, R., Kohno, K., (3 番目, 4 番目, 他 21 名), A Radio-to-mm Census of Star-forming Galaxies in Protocluster 4C23.56 at $z = 2.5$: Gas Mass and Its Fraction Revealed with ALMA, *The Astrophysical Journal*, 842, id. 55 (23pp) (2017) 10.3847/1538-4357/aa74c2
- ⑤ Hayashi, M., Kodama, T., Kohno, K., (3 番目, 他 7 名), Evolutionary Phases of Gas-rich Galaxies in a Galaxy Cluster at $z = 1.46$, *The Astrophysical Journal*, 841, L21 (6pp) (2017) 10.3847/2041-8213/aa71ad
- ⑥ Tosaki, T., Kohno, K., (2 番目, 他 8 名) A statistical study of giant molecular clouds traced by ^{13}CO , C^{18}O , CS, and CH_3OH in the disk of NGC 1068 based on ALMA observations, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 69, id. 18 (25pp) (2017) 10.1093/pasj/psw122
- ⑦ Davis, K. K., Jellema, W., Yates, S. J. C., Ferrari, L., Baselmans, J. J. A., Kohno, K. (6 番目, 他 3 名) Proof-of-Concept Demonstration of Vector Beam Pattern Measurements of Kinetic Inductance Detectors, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 7, pp. 98-106 (2016) 10.1109/TTHZ.2016.2617869
- ⑧ Yamaguchi, Y., Tamura, T., Kohno, K., (2 番目, 3 番目, 他 22 名) SXDF-ALMA 2 arcmin² deep survey: Resolving and characterizing the infrared extragalactic background light down to 0.5 mJy, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id. 82 (15pp) (2016)
10.1093/pasj/psw073
- ⑨ Ando, R., Kohno, K., Tamura, Y., (2 番目, 3 番目, 他 3 名) New detections of Galactic molecular absorption systems toward ALMA calibrator sources, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id. 6 (11pp) (2016)
10.1093/pasj/psv110
- ⑩ Izumi, T., Kohno, K., (2 番目, 他 17 名) Submillimeter-HCN Diagram for Energy Diagnostics in the Centers of Galaxies, *The Astrophysical Journal*, 818, id. 42 (23 pp) (2016) 10.3847/0004-637X/818/1/42
- ⑪ Umehata, H., Tamura, Y., Kohno, K., (2 番目, 3 番目, 他 20 名) ALMA Deep Field in SSA22: A Concentration of Dusty Starbursts in a $z = 3.09$ Protocluster Core, *The Astrophysical Journal Letters*, 815, L8 (6pp) (2015) 10.1088/2041-8205/815/1/L8
- ⑫ Tadaki, K., Kohno, K., (2 番目, 他 24 名) SXDF-ALMA 1.5 arcmin² Deep Survey: A Compact Dusty Star-forming Galaxy at $z = 2.5$, *The Astrophysical Journal Letters*, 811, L3 (6pp) (2015)
10.1088/2041-8205/811/1/L3
- ⑬ Izumi, T., Kohno, K., (2 番目, 他 31 名) ALMA Observations of the Submillimeter Dense Molecular Gas Tracers in the Luminous Type-1 Active Nucleus of NGC 7469, *The Astrophysical Journal*, 811, id. 39 (15pp) (2015)
10.1088/0004-637X/811/1/39
- ⑭ Ikarashi, S., Ivison, R. J., Caputi, K., Aretxaga, I., Dunlop, J. S., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Iono, D., Izumi, T., Kawabe, R., Kohno, K., (10 番目, 11 番目, 他 9 名) Compact Starbursts in $z = 3-6$ Submillimeter Galaxies Revealed by ALMA, *The Astrophysical Journal*, 810, id. 133 (12pp) (2015)
10.1088/0004-637X/810/2/133
- ⑮ Tamura, Y., Kawabe, R., (1 番目, 2 番目, 他 26 名) Extremely Bright Submillimeter Galaxies beyond the Lupus-I Star-forming Region, *The Astrophysical Journal*, 808, id. 121 (14pp) (2015)
10.1088/0004-637X/808/2/121
- ⑯ Matsuda, Y., Nagao, T., Iono, D., Hatsukade, B., Kohno, K., Tamura, Y., (5 番目, 6 番目, 他 2 名) The ALMA Patchy Deep Survey: a blind search for [CII] emitters at $z \sim 4.5$, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451, 1141-1145 (2015) 10.1093/mnras/stv1044
- ⑰ Fathi, K., Izumi, T., Kohno, K., (9 番目, 他 11 名) Local Instability Signatures in ALMA Observations of Dense Gas in NGC 7469, *The Astrophysical Journal Letters*, 806, L34 (6pp) (2015)
10.1088/2041-8205/806/2/L34
- ⑱ Onishi, K., Iguchi, S., Sheth, K., Kohno, K., A Measurement of the Black Hole Mass in NGC 1097 Using ALMA, *The Astrophysical Journal*, 806, id. 39 (8pp) (2015) 10.1088/0004-637X/806/1/39
- ⑲ Nakajima, T., Takano, S., Kohno, K., (他 6 名) A multi-transition study of molecules toward NGC 1068 based on high-resolution imaging observations with ALMA, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 67, id. 8 (15pp) (2015)
10.1093/pasj/psu136
- ⑳ Martin, S., Kohno, K., (他 18 名), Multimolecule ALMA observations toward the Seyfert 1 galaxy NGC 1097, *Astronomy & Astrophysics*, 573, A116 (13pp) (2015)
10.1051/0004-6361/201425105
- ㉑ Takano, S., Nakajima, T., Kohno, K., (他 6 名), Distributions of molecules in the circumnuclear disk and surrounding starburst ring in the Seyfert galaxy NGC 1068 observed with ALMA, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 66, id.

75 (14pp) (2014) 10.1093/pasj/psu052
 ② Hatsukade, B., Ohta, K., Endo, A., Nakanishi, K., Tamura, Y., Kohno, K., Two γ -ray bursts from dusty regions with little molecular gas, *Nature*, 510, 247-249 (2014) 10.1038/nature13325
 ③ Umehata, H., Tamura, Y., Kohno, K., (他 22 名) AzTEC/ASTE 1.1-mm survey of SSA22: Counterpart identification and photometric redshift survey of submillimetre galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440, 3462-3478 (2014) 10.1093/mnras/stu447
 ④ Tadaki, K., Kodama, T., Tamura, Y., (他 7 名) Evidence for a Gas-rich Major Merger in a Proto-cluster at $z = 2.5$, *The Astrophysical Journal*, 788, L23 (5pp) (2014) 10.1088/2041-8205/788/2/L23
 ⑤ Miura, R. E., Kohno, K., (他 14 名) Enhancement of CO(3-2)/CO(1-0) Ratios and Star Formation Efficiencies in Supergiant HII Regions, *The Astrophysical Journal*, 788, id. 167 (7pp) (2014) 10.1088/0004-637X/788/2/167
 ⑥ Uchi, M., Ellis, R., Ono, Y., Nakanishi, K., Kohno, K., (他 8 名), An Intensely Star-forming Galaxy at $z \sim 7$ with Low Dust and Metal Content Revealed by Deep ALMA and HST Observations, *The Astrophysical Journal*, 778, id.102 (12pp) (2013) 10.1088/0004-637X/778/2/102
 ⑦ Izumi, T., Kohno, K., (他 24 名) ALMA Observations of the Dense Gas in the Low-Luminosity Type-1 Active Nucleus of NGC 1097, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65, id. 100 (26pp) (2013) 10.1093/pasj/65.5.100

[学会発表] (計 23 件)

① Kohno, K., “Blind spectroscopic galaxy surveys using an ultra-wide-band imaging spectrograph on AtLAST and LST (and LMT)”, AtLAST workshop, ESO, Garching, Germany 2018/01
 ② Kohno, K., “Quest for dusty high- z star-forming galaxies based on unbiased ALMA deep survey”, *Distant Galaxies from the Far South*, Barilloche, Argentina, 2017/12
 ③ Kohno, K., “Galactic nuclei and feedback processes”, *The origin of galaxies, stars, and planets in the era of ALMA*, Caltech, Pasadena, USA, 2017/12 (invited)
 ④ Kohno, K., “Dusty star-forming galaxies explored with ALMA”, *Star Formation in Different Environments 2017: From local clouds to distant galaxies*, Quy-Nhon, VietNam, 2017/7 (invited)
 ⑤ Kohno, K., “Multi-wavelength surveys

of dusty star-forming galaxies using AzTEC, SCUBA2, Subaru and ALMA”, *SMG20 - Twenty years of Submillimetre Galaxies: star-forming galaxies at high redshifts*, Durham, UK, 2017/06 (invited)

⑥ Ishii, S., Endo, A., Karatsu, K., Kohno, K., Tamura, Y., Oshima, T., Takekoshi, T., Baselmans, J., et al., “Development of DESHIMA for ASTE”, ALMA/NRO45m/ASTE/Mopra Users Meeting 2015, Tokyo, Japan, 2015/10/20-22

⑦ Ishii, S., Endo, A., Oshima, T., Kohno, K., et al. “Development of DESHIMA for ASTE telescope”, 15th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Ise-shima, Mie, Japan, 2014/12/15-17

⑧ Oshima, T., “Multicolor mm/submm TES bolometer camera development for ASTE”, ASTE/ALMA development workshop, NAOJ, Mitaka, Japan, 2014/06/17-18 (他 15 件)

[その他] ホームページ等

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kkohno/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 孝太郎 (KOHNO, Kotaro)
 東京大学・大学院理学系研究科・教授
 研究者番号：80321587

(2) 研究分担者

大島 泰 (OSHIMA, Tai)
 国立天文台・先端技術センター・助教
 研究者番号：40450184

(3) 連携研究者

田村 陽一 (TAMURA, Yoichi)
 名古屋大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：10608764

川邊 良平 (KAWABE, Ryohei)
 国立天文台・電波天文学研究系・教授
 研究者番号：10195141

松原 英雄 (MATSUHARA, Hideo)
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・
 宇宙科学研究所・教授
 研究者番号：30219464

(4) 研究協力者

石井 峻 (SHUN Ishii)
 国立天文台・チリ観測所・助教

遠藤 光 (ENDO Akira)
 Delft University of Technology
 Assistant Professor