

令和元年6月11日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26247019

研究課題名(和文)大規模電波カメラによる「あかり」北極域の掃天観測

研究課題名(英文) Survey observations of the AKARI NEP deep field with a large number beam radio camera

研究代表者

中井 直正 (Nakai, Naomasa)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：80192665

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,500,000円

研究成果の概要(和文)：国立天文台野辺山45m電波望遠鏡に搭載し、天空上の109点の100GHz帯の連続波電波を同時に観測可能な高感度超伝導電波カメラ(MKID)の開発を行った。従来のTESボロメータカメラに比べて、1本の読出线・回路で数100素子を同時に読み出せること、素子の歩留まりが80%以上と高いこと、ダイナミックレンジが高いので強度較正装置が使えるという大きな利点がある。また科学観測に向けて、遠方銀河のダスト放射を複数周波数で観測した場合の銀河の距離(赤方偏移)やダストの物理量(温度、光度)の測定精度の検討を行った。今後この観測システムで「あかり」北極域の大規模掃天観測を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、遠方銀河は可視光での観測が多いが電波で銀河のダスト放射を観測して得られる銀河の数の方が数倍～十倍も多く、また宇宙での星形成史も大きく異なっている。可視光で見えない銀河が圧倒的に多いのである。開発した野辺山45m電波望遠鏡+MKID電波カメラの高感度広域掃天観測システムは遠方($z>7$)の赤方偏移した銀河ダストの放射の検出に威力を発揮する。また開発した技術によりテラヘルツ波を含めて100GHz以上の他の周波数の連続波電波カメラの開発に応用できて、将来の南極テラヘルツ望遠鏡用の1万素子や20万素子の超大規模電波カメラの開発を可能とするものである。

研究成果の概要(英文)：We have developed a superconducting camera based on microwave kinetic inductance detectors (MKID) which can simultaneously observe 109 positions on the sky at the 100-GHz band by equipping with the Nobeyama 45-m telescope. Comparing with the traditional TES bolometer camera, the MKID camera has advantages that one readout line can read output of several hundred pixels, its yield is high (more than 80%) and the dynamic range is high so that we can use a hot load to calibrate the intensity of target objects. We have also examined the accuracy of determination of photometric distance (redshift) and physical parameters of dust (temperature, luminosity), by simulating dust spectra of model galaxies. With the developed camera, the AKARI NEP Deep Field will be surveyed.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 銀河 高赤方偏移 電波カメラ MKID

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大型光学赤外線望遠鏡(すばる等)や宇宙望遠鏡に広視野カメラを搭載して高感度でかつ非常に広い天空を掃天観測することによって(少なくとも)赤方偏移 $z \sim 7$ までの宇宙論的距離にある銀河が多数発見されている。それによって、宇宙再電離の時期の下限が理解され、また遠方宇宙での銀河の形態などに大きな研究手段を提供しており、研究の進展も著しい。一方、観測波長や観測手段、観測領域などによって多くの種類の高赤方偏移天体が発見され(「銀河動物園」状態)、異なる結果が出ている場合もあり、ある種、混乱状態である。

一方、光学赤外線望遠鏡では受からず、サブミリ波などの電波でのみ観測可能な銀河が多数発見されている。しかも、図1に示すように、

(1)サブミリ波(銀河では赤外線)観測から求めた宇宙の星形成率が数倍~十倍も高い。つまり銀河内の吸収が大きい可視光(銀河では紫外線)観測では宇宙のごく一部しか見えていない。これは、紫外線は銀河内のダストに吸収されるので弱くなるのに対して赤外線は吸収されないためである。

(2)可視光観測では、宇宙の星形成は赤方偏移が $z \sim 2-3$ で最大であり、その前後では減少していることになっているが、サブミリ波では $z=3-1$ では星形成が一定であり、 $z=1 \rightarrow 0$ で減少するという大きく異なる結果が得られている。但し、 $z > 3$ での星形成史はまだわかっていない。

よって、 $z > 3$ での電波観測、しかも、統計的有意性を得るための宇宙の大規模構造以上の広い領域の掃天観測が強く要請されている。

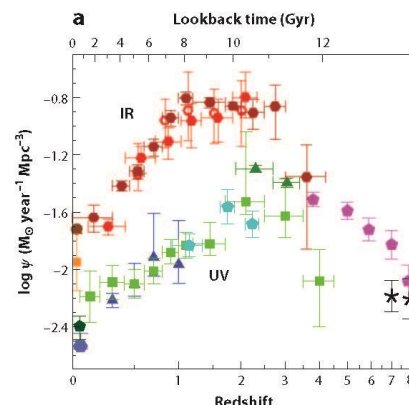


図1. サブミリ波(銀河では赤外線)と可視光(銀河では紫外線)で求められた星形成率の赤方偏移 z 依存性 (Madau & Dickinson 2014)。サブミリ波で求めた値の方が数倍~十倍大きく、宇宙における星形成史も大きく異なる。

2. 研究の目的

高赤方偏移銀河から放射された赤外線を地上で電波として観測し、非常に広い領域の掃天観測により統計的に有意な数の銀河の観測から $z > 3$ さらには7以上の領域の星形成率や銀河の分布から $\log N - \log S$ や宇宙大規模構造の解明などを行う。具体的な領域として赤外線衛星「あかり」が観測した銀河系前景光であるシラスの少ない北の極域領域を観測する。「あかり」は波長 $60-160 \mu\text{m}$ で1平方度、 $2.5-24 \mu\text{m}$ で0.38平方度を探索し、6500個以上の銀河候補天体を発見した。その領域をダスト放射のピークの反対側のレーリー・ジーンズ側のミリ波で観測し、JCMTで計画されている670GHzと350GHzのデータと合わせてスペクトルを決定し、測光距離(赤方偏移)、ダストの温度、ダスト放射の光度、星形成率を求める。ミリ波では $z > 3$ ではフラックス密度は変わらない、更には負のK効果からより高赤方偏移になるほど明るくなるので高赤方偏移にある銀河の探索を行うには非常に有利である。これにより「あかり」で受かっているより高赤方偏移の銀河の検出も期待される。

3. 研究の方法

国立天文台の野辺山45m電波望遠鏡に周波数220GHz(波長1360 μm)の超伝導電波カメラを搭載し、その内側26mを利用して5'の視野内の450点を12.8'の角分解能で同時観測するシステムを構築する。超伝導電波カメラの素子としては力学インダクタンス検出器(MKID)を用いたものを開発する。これは従来のTESボロメータを用いたものに比べて、①1組の読出線・回路で数百素子の出力を読み出すことができる、②歩留まりが非常に高い(8割~9割以上)、③ダイナミックレンジが高いので常温の強度校正装置を用いて天体の強度を求めることができる、という大きな利点がある。これにより、電波カメラとしては数千素子や数万素子も可能となる有望な検出器である。また、観測周波数と観測感度から測光距離(赤方偏移)、ダストの温度およびダスト放射の光度の測定精度の見込みをシミュレーションする。MKIDカメラを45m鏡に搭載して試験観測を行い性能測定を行った後、あかり北極領域を掃天観測する。

4. 研究成果

本申請後に野辺山45m鏡のアンテナ鏡面精度の経年劣化が明らかになり、220GHzでは開口能率が低下していることが判明した。そのため、観測周波数を100GHzに変更し、しかし45m鏡全面を使用して17'の角分解能で視野3'を109素子で観測する超伝導電波カメラを開発することにした。

開発を行った超伝導電波カメラの諸元を表1に示す。開発した電波カメラは、2016年12月

表1. 超伝導電波カメラの諸元

観測周波数	100-GHz帯(90~110GHz)
視野	~3 arcmin
偏波	直線, 片偏波
超伝導検出器	Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)
冷却光学系	シリコンレンズを用いた屈折式光学系
素子数	109素子
動作温度	< 200 mK

下旬から 2017 年 1 月上旬に一回目の、2018 年 5 月上旬から 2018 年 6 月上旬に二回目の搭載試験を行った。惑星を用いて検出器歩留まり、空間感度分布（ビームパターン）、安定性、検出器感度、各種能率の評価を行った。ビームパターン、検出器歩留まり、安定性については期待される結果を得ることができた。一方、検出器感度は目標値より一桁低く、各種能率は想定より 10%程度低いことが分かった。本観測に向けた感度の向上は今後の課題である。

(1) 焦点面アレイの開発

電波カメラの心臓部である超伝導検出器には、光学インダクタンス検出器 (MKID) を用いている。図 2 (a), (b) に、本研究で開発をした 1/4 波長共振器を利用したアンテナ結合型 MKID 一素子の顕微鏡写真と、等価回路を示す。図 2 (c) は 300 K, 77 K の黒体源による MKID の光学応答の例であり、光子が入射することで超伝導体特有の力学インダクタンス L_k が変化した結果、 $(LC)^{-1/2}$ に比例する共振周波数が変化した様子を表している。この共振周波数の変化から天体信号を検出する。

焦点面アレイは 3 インチ基板全面に配置された 109 素子アンテナ結合型 MKID アレイと、対称性がよくサイドローブの低いビームパターンを実現するための直径 5.7 mm の 109 素子シリコンレンズアレイから構成される。MKID の超伝導材料はアルミニウム (Al) であり、電子線蒸着にて厚み 150 nm で成膜した。また、シリコンは屈折率が 3.4 と高く、ミリ波帯での吸収も非常に少ないためレンズ材料には適しているが、表面反射による損失が約 30% と大きいことから反射防止 (AR) 膜の開発が必須である。一方、極低温に冷やした際にレンズと AR 膜の熱膨張率の違いからレンズが破損する可能性があるため、熱膨張率が小さいガラスビーズとエポキシ樹脂を組み合わせた AR 膜を開発した。この 109 素子焦点面アレイにて、視野約 3 arcmin の観測を実現する。

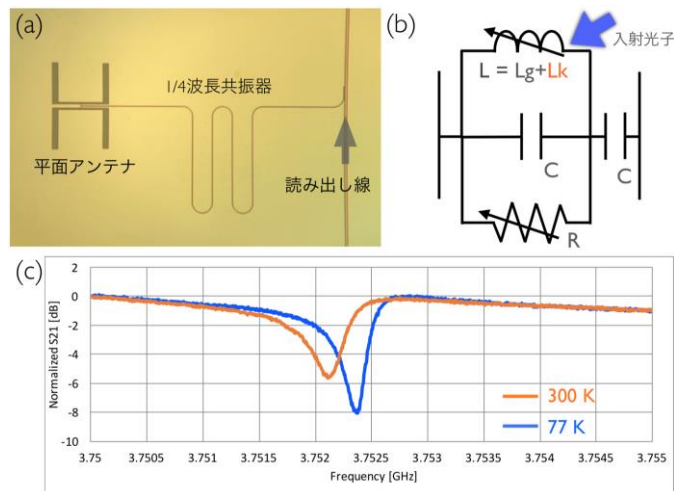


図 2. (a)MKID 一素子の顕微鏡写真, (b)等価回路, (c)MKID の透過特性 (S21) の測定例

(2) 100-GHz 帯超伝導電波カメラ

図 3 (a) に、開発した 100-GHz 帯超伝導電波カメラの写真を示す。図 3 (b) は電波カメラの機械設計図であり、実際は時計周りに 90 度回転した向きで設置されている。電波カメラは大きく分けると①冷却システム、②焦点面アレイ、③冷却光学系から構成されている。MKID の超伝導材料に用いている Al の超伝導転移温度は約 1.2 K であり、高感度を実現するには動作温度を 200 mK 以下にする必要がある。

そのため、冷却システムには Gifford-McMahon 冷凍機と希釈冷凍機を用いている。電波カメラ冷却光学系はシリコンレンズを用いた屈折式光学系となっており、この光学系により野辺山 45-m 望遠鏡伝送光学系と、焦点面アレイを効率よく結合している。

冷却光学系は図 3 (b) に示す通り、電波が入射する真空窓、直径 300 mm と 154 mm のシリコンレンズ、迷光を低減するための冷却バッフル、観測周波数以外の電磁波（特に赤外線）を遮断するフィルター等から構成される。シリコンレンズは前述の通り AR 膜が必要であるが、冷却光学系のレンズは面積が大きくガラスビーズを用いる方法が困難であったため、サブ波長構造を利用した。直径 154 mm のレンズには、ダイシングソーを用いた加工によってピラミッド型サブ波長構造をレンズ表面に形成した。ネットワークアナライザを用いた測定から、表面反射率は観測帯域内で約 1% と大幅に低減できたことを確認した。これらの要素技術を組み合わせることで、焦点面アレイが設置されているステージの到達温度は 64 mK を達成した。

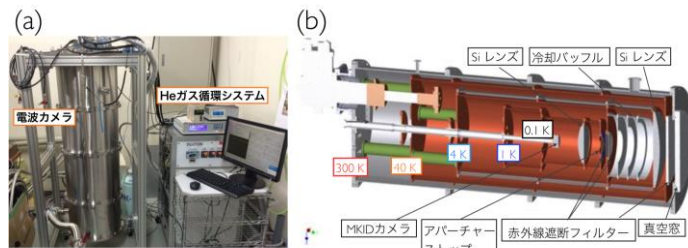


図 3. (a)電波カメラシステムの写真, (b)機械設計図

(3) 実験室における性能評価

希釈冷凍機を用いて焦点面アレイを 100 mK 程度まで冷却して、ネットワークアナライザ等により 109 素子 MKID アレイの透過特性 (S21) の測定を行った。MKID の共振スペクトルの測定から、検出器歩留まりは約 93%、共振の鋭さを表す Q 値 (Qi) は約 10^5 とそれぞれ高い値を得た。また、検出器の雑音を表す雑音等価電力 (NEP) の測定をダーク環境 (1 K シールドからの放射で制限された環境) で行い、25 素子の平均で 3.2×10^{-16} [W/rHz] を得た。

100-GHz 帯の発振源および X-Y ステージを用いて、真空窓近傍に作られる電波カメラの焦点付近でビームウエストサイズの測定を行った。結果、物理光学シミュレーションから予想されるウエストサイズ 20.6 mm と概ね一致することを確認した。また、電波カメラの周波数特性についても、フーリエ分光器を用いて評価を行った。得られた周波数帯域は 90–120 GHz となり、90-GHz は MKID の超伝導材料 Al のギャップエネルギーに、120-GHz はフィルターのカットオフ周波数に対応していることから、想定通りの結果を得た。

109 素子 MKID アレイの多素子同時読み出しには、国立天文台先端技術センターで開発された高速フーリエ変換を利用した読み出し回路を用いている [1]。1 GHz の帯域内に周波数コム信号を発生させて変調、復調することによって高周波数分解能と広帯域測定を実現し、微弱な応答の読み出しと多素子化を両立している。

(4) 搭載試験

2018 年 5 月上旬から 2018 年 6 月上旬にかけて、二回目となる野辺山 45-m 電波望遠鏡への搭載試験を行った。図 4 に開発したデータ取得システムを示す [2]。ワークステーションにより、望遠鏡の位置情報、電波カメラからの取得データを結合させている。

受信機室での性能評価の結果、実験室と同様に 101 素子 (約 93%) の共振スペクトルを確認した。また望遠鏡駆動時の磁場対策として、電波カメラの常温部、低温部にそれぞれ磁場シールドを施した結果、望遠鏡駆動時でも検出器雑音に変化しないことを確認した。

搭載試験では、大気および月の仰角スキャン、惑星 (火星、金星、木星) および電波源 (3C84) などのラスタースキャンを行った。73 素子の火星の測定データからビーム幅を求めた結果、 17.7 ± 2.2 arcsec となり、シミュレーション結果である 16.3 arcsec と概ね一致した。また、天球上でのビーム位置を決定できた素子数は 90 素子 (約 82%) であり、想定している視野 3 arcmin 内に分布していることを確認した。また、安定性についても観測に影響がないことを確認した。図 5 (a) に火星の観測から得られた 100-GHz ビームマップの一例を、(b) にビームパターンの断面図を示す。図 5 (b) から、サイドローブレベルは -10 dB 以下であることが確認できる。

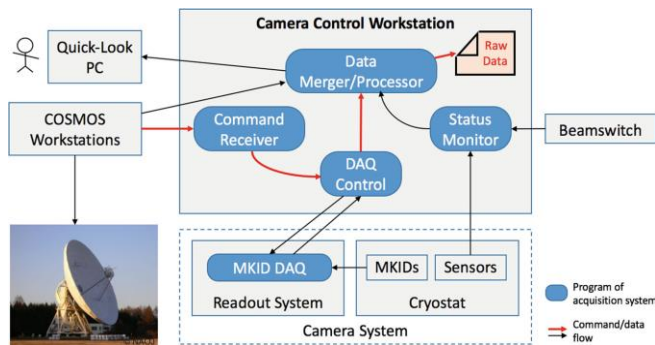


図 4. 電波カメラのデータ取得システム [2]

一方、能率については、主ビーム能率 $\eta_{MB} = 0.33 \pm 0.07$ 、開口能率 $\eta_A = 0.23 \pm 0.04$ (アレイ平均) が得

られた。これらの値は同じ周波数帯の既存の装置より 10%程度低く、カメラのアライメント調整が必要と考えられる。また、観測感度についても大気揺らぎで制限される目標値よりも一桁ほど悪かった。これまでの結果から、電波カメラの冷却系、光学系、焦点面アレイの歩留まり、安定性、データ取得系については良好な結果を得ることができたため、本観測に向けて今後、MKID の高感度化を図る。

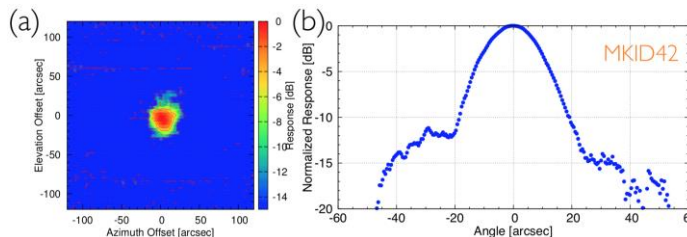


図 5. (a) 100-GHz ビームマップの一例、(b) 断面図

(5) 観測周波数と感度によるダスト放射の物理量の決定精度の検討

銀河からのダスト放射のスペクトルを 4 つのパラメータ (ダスト温度、 β 、最大フラックス密度、赤方偏移 z) でモデル化し、それを「あかり」の $15 \mu\text{m}$ と $25 \mu\text{m}$ 、JCMT の $850 \mu\text{m}$ および本研究の野辺山 45m 鏡の 3mm で観測した場合に、それぞれの測定誤差を与えて 4 つのパラメータがどの程度精度良く決定できるかをシミュレーションにより検討した。その結果、各波長で 5σ 程度の精度でフラックス密度を測定できた場合、ダスト温度または β をある程度の値 (爆発的星形成銀河の典型な値など) で与えれば、赤方偏移 z は 5%程度の精度で決められることがわかった (図 6)。

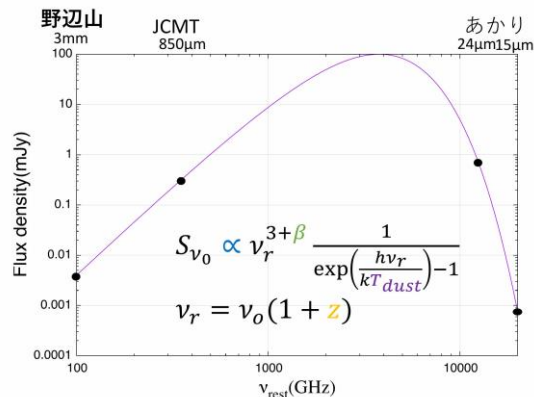


図 6. モデル銀河 (星形成銀河) のスペクトルと観測波長

今後はMKIDの高感度化を図った上で再度45m鏡に搭載して、あかり北極域の掃天観測を行う予定である。さらに他の天域の広域観測も検討している。

<引用文献>

[1] H. Kiuchi et al., "A Frequency Sweeping Readout System for Kinetic Inductance Detectors Based on Submillimeter Radio Astronomy", IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Vol5, 2015, 456 - 463

[2] M. Nagai et al., "Data Acquisition System of Nobeyama MKID Camera", Journal of Low Temperature Physics, Vol193(3-4), 2018, 585-592

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

1. T. Nitta, Y. Sekimoto, T. Hasebe, K. Noda, S. Sekiguchi, M. Nagai, S. Hattori, Y. Murayama, H. Matsuo, A. Dominjon, W. Shan, M. Naruse, N. Kuno, N. Nakai, "Design, Fabrication and Measurement of Pyramid-Type Antireflective Structures on Columnar Crystal Silicon Lens for Millimeter-Wave Astronomy", Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 193(5-6), 2018, 976-983
2. M. Nagai, S. Hisamatsu, G. Zhai, T. Nitta, N. Nakai, N. Kuno, Y. Murayama, S. Hattori, P. Mandal, Y. Sekimoto, H. Kiuchi, T. Noguchi, H. Matsuo, A. Dominjon, S. Sekiguchi, M. Naruse, J. Maekawa, T. Minamidani, M. Saito, "Data Acquisition System of Nobeyama MKID Camera", Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 193(3-4), 2018, 585-592
3. Tom Nitta, Yutaro Sekimoto, Kazufusa Noda, Shigeyuki Sekiguchi, Shibo Shu, Hiroshi Matsuo, Agnes Dominjon, Masato Naruse, Nario Kuno, Naomasa Nakai, "Broadband Pillar-Type Antireflective Subwavelength Structures for Silicon and Alumina", IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 査読有, 7(3), 2017, 295-301
4. S. Sekiguchi, M. Sugimoto, S. Shu, Y. Sekimoto, K. Mitsui, T. Nishino, N. Okada, K. Kubo, T. Takahashi, T. Nitta, "Broadband Corrugated Horn Array with Direct Machined Fabrication", IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 査読有, 7(1), 2017, 36-41
5. A. Dominjon, Y. Sekimoto, T. Noguchi, N. Nakai, N. Kuno, T. Nitta, Y. Murayama, S. Hattori, M. Nagai, W. L. Shan, S. Shu, S. Sekiguchi, "Development and Characterization of a MKID Camera for the Nobeyama Radio Observatory 45m Telescope", Proceedings of 16th International Superconductive Electronics Conference (ISEC), 査読無, 2017
6. Agnes Dominjon, Masakazu Sekine, Kenichi Karatsu, Takashi Noguchi, Yutaro Sekimoto, Shibo Shu, Shigeyuchi Sekiguchi, Tom Nitta, "Study of Superconducting Bilayer for Microwave Kinetic Inductance Detectors for Astrophysics", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, 26(3), 2016, 2400206
7. Masato Naruse, Tom Nitta, Kenichi Karatsu, Masakazu Sekine, Shigeyuki Sekiguchi, Yutaro Sekimoto, Takashi Noguchi, Tohru Taino, Hiroaki Myoren, "Dual-Double Slot Antennas Fabricated with Single Superconducting Film for Millimeter Wave Camera", Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 査読有, 37(2), 2016, 128-136
8. Kenji Mitsui, Tom Nitta, Norio Okada, Yutaro Sekimoto, Kenichi Karatsu, Shigeyuki Sekiguchi, Masakazu Sekine, Takashi Noguchi, "Fabrication of 721-pixel silicon lens array of a microwave kinetic inductance detector camera", Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 査読有, 1(2), 2015, 025001
9. Toshihiro Tsuzuki, Tom Nitta, Hiroaki Imada, Masumichi Seta, Naomasa Nakai, Shigeyuki Sekiguchi, Yutaro Sekimoto, "Design of wide-field Nasmyth optical system for a submillimeter camera", Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 査読有, 1(2), 2015, 025002
10. Shigeyuki Sekiguchi, Tom Nitta, Kenichi Karatsu, Yutaro Sekimoto, Norio Okada, Toshihiro Tsuzuki, Shingo Kashima, Masakazu Sekine, Takashi Okada, Shibo Shu, Masato Naruse, Agnes Dominjon, Takashi Noguchi, Hiroshi Matsuo, "Development of a Compact Cold Optics for Millimeter and Submillimeter Wave Observations", IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 査読有, 5(1), 2015, 49-56,
11. Tom Nitta, Shigeyuki Sekiguchi, Yutaro Sekimoto, Kenji Mitsui, Norio Okada, Kenichi Karatsu, Masato Naruse, Masakazu Sekine, Hiroshi Matsuo, Takashi Noguchi, Masumichi Seta, Naomasa Nakai, "Anti-reflection Coating for Cryogenic Silicon and Alumina Lenses in Millimeter-Wave Bands", Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 176(5-6), 2014, 677-683
12. Tom Nitta, Kenichi Karatsu, Yutaro Sekimoto, Masato Naruse, Masakazu Sekine, Shigeyuki Sekiguchi, Hiroshi Matsuo, Takashi Noguchi, Kenji Mitsui, Norio Okada, Masumichi Seta, Naomasa Nakai, "Close-Packed Silicon Lens Antennas for Millimeter-Wave MKID Camera", Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 176(5-6), 2014, 684-690

[学会発表] (計 10 件)

1. 永井誠、野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯 109 素子 MKID カメラの搭載試験、日本天文学会 2019 年春季年会、2019
2. 村山洋佑、野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯電波カメラの光学評価、日本天文学会 2018 年秋季年会、2018
3. 村山洋佑、野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯電波カメラの MKID アレイ開発、日本天文学会 2018 年春季年会、2018
4. M. Nagai, Acquisition System of Nobeyama MKID Camera, 17th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2017
5. T. Nitta, Pyramid-type Antireflective Structures on Silicon Lenses for Millimeter-wave Observations, 17th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2017
6. 永井誠、野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用 MKID カメラの搭載試験、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017
7. 新田冬夢、野辺山 45m 電波望遠鏡搭載に向けた 90/150-GHz 帯 MKID カメラの開発、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016
8. T. Nitta, Broadband Antireflective Subwavelength Structures for Large Diameter Silicon Lenses, 27th International Symposium on Space Terahertz Technology, 2016
9. 永井誠、野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用 MKID カメラの観測システムの構築、日本天文学会 2016 年春季年会、2016
10. 新田冬夢、野辺山 45m 電波望遠鏡搭載に向けた 220-GHz 帯超伝導カメラの開発、日本天文学会 2014 年秋季年会、2014

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：永井 誠

ローマ字氏名：(NAGAI, Makoto)

所属研究機関名：筑波大学

部局名：数理物質系

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：50522877

研究分担者氏名：瀬田 益道

ローマ字氏名：(SETA, Masumichi)

所属研究機関名：筑波大学

部局名：数理物質系

職名：講師

研究者番号 (8 桁)：80358994

研究分担者氏名：久野 成夫

ローマ字氏名：(KUNO, Nario)

所属研究機関名：筑波大学

部局名：数理物質系

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：30311179

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：新田 冬夢

ローマ字氏名：(NITTA, Tomu)

研究協力者氏名：村山 洋佑

ローマ字氏名：(MURAYAMA, Yosuke)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。