

機関番号：62616

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05327・20K20346

研究課題名（和文）超高解像度観測を実現するテラヘルツ強度干渉計の開発

研究課題名（英文）Development of Terahertz Intensity Interferometry for Super High Angular Resolution

研究代表者

松尾 宏（Matsuo, Hiroshi）

国立天文台・先端技術センター・准教授

研究者番号：90192749

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：サブミリ波と遠赤外線を含むテラヘルツ領域において、超高解像度観測を実現可能なテラヘルツ強度干渉計に向けた基礎開発を行った。超伝導トンネル接合を用いた高速動作のSIS光子検出器で超低リーク電流の高感度サブミリ波検出器を実現し、極低温で動作する広帯域の読出し回路と組み合わせることで光子パンチの計測を可能な検出器システムを構成した。強度干渉計による画像合成の実証実験に向けて、光学実験用クライオスタット、0.8K吸着冷凍器、および強度干渉計の光学システムを製作し、強度干渉計の実証実験を開始した。テラヘルツ帯の天体観測を目指して、南極高地からのテラヘルツ強度干渉計を立案し計画を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波領域は、星形成領域のダスト熱放射および原子輝線放射の観測で星形成領域の活動性を評価するために重要な波長域である。宇宙の成り立ちを解明するうえでも、ダスト熱放射と原子輝線放射から天体の形成と進化を明らかにすることができる。地上から観測可能なサブミリ波領域では大型ミリ波サブミリ波干渉計ALMAによる高赤方偏移天体の高解像度観測が行われているが、1THz以上の周波数帯では大気透過率の制限で高解像度の観測が困難である。本研究は、強度干渉計をテラヘルツ帯の観測に導入することで、南極高地からのテラヘルツ帯高解像度観測や宇宙空間からの高感度高解像度観測の実現を目指すものである。

研究成果の概要（英文）：Basic research was performed to realize terahertz intensity interferometry to achieve high angular resolution observation in submillimeter to far-infrared region. Low leakage superconducting tunnel junctions were used to realize SIS photon detectors for fast and high sensitivity measurements in submillimeter-wave. Cryogenic wide bandwidth readout electronics enables measurements of terahertz photon bunches. Toward aperture synthesis imaging with intensity interferometry, a cryostat for optical experiments was developed as well as 0.8K sorption coolers and experimental optics of intensity interferometry. Optical experiments were started for demonstration of aperture synthesis imaging. To realize terahertz astronomical observations, Antarctic intensity interferometry was planned and the program is on-going.

研究分野：電波天文学

キーワード：テラヘルツ技術 強度干渉計 超伝導検出器 冷却システム 極低温回路

### 1. 研究開始当初の背景

ミリ波、サブミリ波、および遠赤外線領域は遠方宇宙の観測で重要は波長領域である。ミリ波帯での宇宙背景放射の観測、遠方銀河団の観測および星形成が盛んなサブミリ波銀河と呼ばれる天体の観測などが行われてきた。基盤 B (H19-H21)「サブミリ連続波による南天の広域探査」(研究代表者:松尾宏、課題番号 19403005)などにより、アタカマサブミリ波望遠鏡 (ASTE) による連続波サーベイ観測で多くのサブミリ波銀河が観測された。その後、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA による観測が始まり、高赤方偏移の星形成銀河からの電離酸素の輝線 (波長 88 ミクロン) がサブミリ波帯で観測された (Inoue et al. 2016, Science 352, 1559)。これを機会に、電離酸素輝線による最遠方の星形成銀河の観測が次々と行われる (Hashimoto et al. 2018, Nature 557, 392 など)。ところが、近傍星形成銀河の観測は周波数 1 THz 以上のテラヘルツ帯での観測が求められ、アタカマ高原からの大気透過率が悪いいため観測が困難であった。

宇宙空間からの遠赤外線高解像度観測についても将来計画が検討された。基盤 A (H16-H17)「超広帯域・超高感度・超広視野ミリ波サブミリ波天体干渉計の開発」(研究代表者:服部誠、課題番号 16204010)で開発されたマルチフーリエ型天体干渉計が、将来のスペース干渉計技術として期待され、欧米を中心に将来計画が議論されていた。しかし、冷却望遠鏡と長基線干渉計の組み合わせが技術的に困難なこともあり、将来計画として採用されるに至っていない。直接検出器を用いた長基線スペース干渉計の技術開発が開発課題として残っていた。

検出器技術としては、超伝導ボロメータ TES、超伝導共振回路を用いた MKID のほか、基盤 A (H13-H15)「SIS フォトン検出器を用いたサブミリ波カメラの開発」(研究代表者:松尾宏、課題番号 13304015)の開発が挙げられる。本研究では、高速応答が得られる SIS 光子検出器を採用することとし、基盤 A (H18-H20)「超伝導テラヘルツカメラの極低温電子回路の開発」(研究代表者:松尾宏、課題番号 18206042)で開発した極低温回路素子と組み合わせることで広帯域の読み出しを目指した。本研究の準備段階として行った挑戦的萌芽研究 (H27-29)「テラヘルツ光子計数技術を用いた天文観測手法の開拓」(研究代表者:江澤元、課題番号 15K13469)では、SIS 光子検出器の高性能化を目指し、産業技術総合研究所の超伝導アナログ・デジタルデバイス開発拠点 (CRAVITY) の設備を用いて SIS 素子の低リーク電流化 (約 1 pA) を実現した。また、SIS 光子検出器の動作温度で必要な 0.8 K 以下を実現するため、ヘリウムガスを用いた 0.8 K 吸着冷凍器の開発にも着手した。

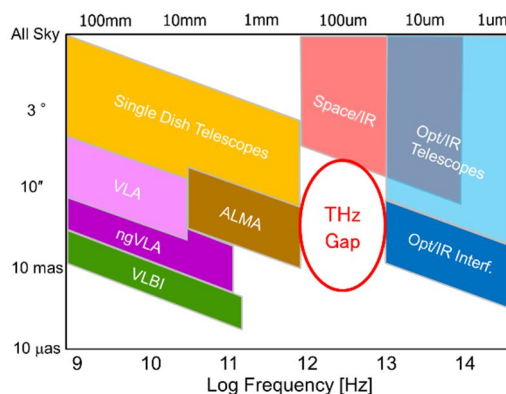


図 1. 天体観測の角度スケール

### 2. 研究の目的

本研究は、天体観測の手法に強度干渉計を導入し、将来のテラヘルツ天体観測の角度分解能および感度を飛躍的に向上させることを目的とする。強度干渉計とは、複数の望遠鏡で受けた天体強度 (電界振幅の 2 乗) の信号を用いて相互相関を得るものであり、ハンブリーブラウンとツイスの実験 (Hanbury-Brown and Twiss 1956, Nature 177, 27)で知られる。1960 年代に恒星視直径の計測に用いられたが、位相情報がないため画像合成ができないと考えられた。我々は光子の統計的ふるまい (光子バンチ) を利用して遅延時間測定ができることを提案し (Matsuo 2012, JLTP 167, 840)、野辺山電波ヘリオグラフを用いた高精度の遅延時間測定により画像合成に必要な複素ビジュビリティが取得できることを実証した (Ezawa et al. 2016, JLTP 184, 244)。

本研究では、テラヘルツ帯で高速の光子検出器を開発し、テラヘルツ強度干渉計により天体画像を合成できることを実験的に示すことを目的とする。このための検出器、極低温回路、冷却技術、および強度干渉計光学系の製作を行い、実験室における光学実験を行う。また、テラヘルツ強度干渉計を用いた将来計画について検討を行い、地上からの観測および宇宙空間からの観測についての検討を行う。

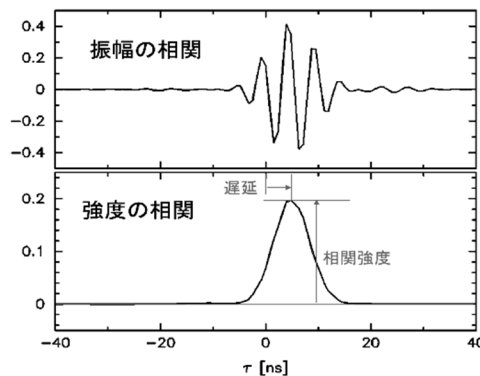


図 2. 野辺山電波ヘリオグラフ (17 GHz) で得た振幅相関と強度相関 (中間周波数 200 MHz, 帯域幅 80 MHz) (Ezawa et al. 2016)

### 3. 研究の方法

本研究は SIS 光子検出器の開発、極低温回路の開発、光学実験用クライオスタットの製作、0.8 K 吸着冷凍器の開発、強度干渉計の光学システムの製作、強度干渉計の実証実験、および将来計画の検討からなる。

SIS 光子検出器の開発は、産業技術総合研究所の超伝導アナログ・デジタルデバイス開発拠点 (CRAVITY) の設備を利用して行う。検出器の設計は 3 次元電磁界シミュレータの HFSS および FEKO を用いて行った。シリコン基板上の超伝導素子の組み合わせで検出器を設計製作した。リーク電流は 1 pA 程度で 500 GHz 帯に感度を持つ検出器を目指した。検出器の性能評価は、液体ヘリウムクライオスタットを用い、磁気シールドルームの中で電流電圧特性の評価を行った。分光特性はサブミリ波帯フーリエ分光器を用いて行った。

極低温回路の開発は、ガリウム砒素半導体のトランジスタ 3 種 (GaAs-JFET, GaAs-JPHEMT, GaAs-HEMT) を候補として、SIS 光子検出器の高い信号インピーダンスを広帯域アンプのインピーダンス 50 Ω への整合回路を実現することを目指した。トランジスタは液体ヘリウムクライオスタットおよび 0.8 K 吸着冷凍器による冷却を行い、半導体パラメータアナライザによる特性評価を行った。読出し回路の帯域として 100 MHz 以上の帯域が確保できることを目標とし、遅延時間測定および強度干渉計の実証実験に用いることを目指した。

光学実験用クライオスタットには、低振動のパルスチューブ 4 K 冷凍機を用い、4 K ステージとの接続には、冷凍機の振動が伝わらない高純度銅線による熱結合を採用した。4 K ステージ上には 0.8 K 吸着冷凍器 2 台、CFRP 板で熱絶縁した 0.8 K ステージ、4 K 読出し回路と広帯域アンプ 2 組を配置し、0.8 K ステージ上には SIS 光子検出器および 0.8 K 回路 2 組を配置することとした (図 5 参照)。光学窓は 2 つあり、それぞれに赤外線をカットシテラヘルツ光を透過する効率の高い光学窓の製作を目指した。

冷却システムとして用いる 0.8 K 吸着冷凍器は本研究における開発項目であり、SIS 光子検出器と極低温回路初段の発熱 (約 100 μW) を吸収しなければならない。吸着冷凍器の開発は、企業との共同研究により行い、設計および加工条件を最適化し、本研究に必要な冷却性能 (200 μW 負荷で 0.8 K) を目指した。

強度干渉計の実証実験のため、球面鏡 (直径 600 mm, R=4800 mm) と黒体光源を用いた入射光学系と基線長 100-500 mm の 2 素子強度干渉計の実現を目指した。本光学系の製作のために、先端技術センター ME ショップの工作機械を用いた。

強度干渉計のシミュレーションのために、国立天文台データセンターの計算機を利用し、強度干渉計による開口合成の可能性について検討した。

将来計画の検討を進めるため、南極高地からの観測可能性について検討を進め、具体的な計画として提案する。将来のスペースからの計画については、研究会等を通じて議論を進め、技術検討課題を明らかにしたうえで将来計画の検討を行った。

### 4. 研究成果

テラヘルツ強度干渉計の実現に向けた様々な基礎開発研究を進めることができた。最終的な強度干渉計による画像合成の実証には至っていないが、テラヘルツ強度干渉計に必要なすべての要素開発を行い、光学実験システムとして完成させ、光学実験を開始できる段階となった。SIS 光子検出器の開発、極低温回路の開発、光学実験用クライオスタットの製作、0.8 K 吸着冷凍器の開発、強度干渉計の光学システムの製作、強度干渉計の実証実験、および将来計画の検討それぞれについて成果を報告する。

SIS 光子検出器の開発は、低リーク電流の SIS 素子開発から開始し、得られた SIS 素子の特性を用いて検出器の設計を行った。SIS 素子のリーク電流は素子面積と共に減少することを確認し、素子作成条件を最適化することで、電流密度 300 A/cm<sup>2</sup> で 3 μm 角の素子で動作温度 0.8 K においてリーク電流が約 1 pA が得られた (Ezawa et al. 2019, JLTP 194, 426)。この特性を用いて SIS 接合を 2 つ用いた PCTJ (Parallel Connected Twin Junction) 型の素子で 500 GHz 帯の検出器を設計した (図 3 上)。ダブルスロット型の平面アンテナおよびコプレーナ線路により SIS 素子まで入力信号を伝える構成で、広帯域の読出し回路との接続が可能となっている。検出器の特性はサブミリ波帯フーリエ分光器により測定し、660 GHz で感度ピークを持つことが確認された (図 3 下 Ezawa et al. 2020)。設計値より高周波にピークを持ち、帯域が広く (36 GHz)、量子効率が低い (約 10%) という測定結果が得られた。それでも、低いリーク電流のため光子計数が可能な検出器性能と考えられる。

極低温回路としては、GaAs-JFET, GaAs-JPHEMT, GaAs-HEMT の 3 種の特性を評価した

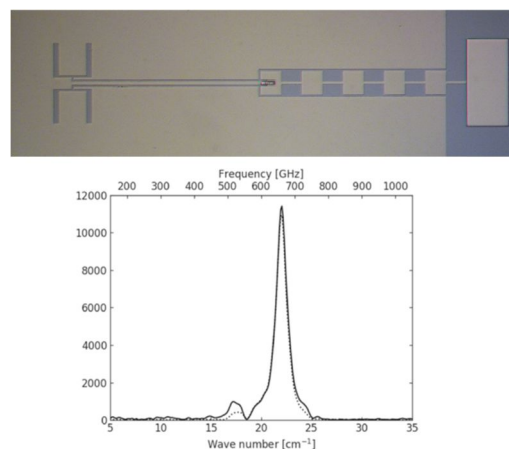


図 3. (上) 本研究で製作したサブミリ波帯 SIS 光子検出器。(下) 検出器の分光感度特性 (Ezawa et al. 2020)。



結果、0.8 K に設置する初段のソースフォロア回路 (SF 回路) には GaAs-JFET、4 K ステージに設置する 2 段目の SF 回路に GaAs-HEMT を用いることとした (図 4)。SIS 検出器は低リーク電流のため出力インピーダンスが高いが、初段 SF 回路で出力インピーダンスが約 3 k $\Omega$ 、2 段目の SF 回路で出力インピーダンスが約 50  $\Omega$  と得られた。この信号を 4 K 動作の広帯域増幅器 (入力インピーダンス 50  $\Omega$ ) で増幅し、同軸ケーブルを經由して室温まで広帯域の信号伝送が可能となった。

冷却システムの開発として、4 K ステージへの熱負荷の少ない小型の 0.8 K 吸着冷凍器を設計し、冷却性能の評価を行った。試作によるパラメータ最適化後、冷却性能として極低温回路の 0.8 K ステージに設置する 1 段目 SF 回路 2 個分の 200  $\mu$ W 負荷で 0.8 K 以下を得ることができた。冷却にはヘリウムガスを用いたヒートスイッチと活性炭ポンプ温度制御により約 30 分で冷却が可能で、最低到達温度 0.72 K、冷却保持時間約 3 時間が得られた。クライオスタットに 2 台の吸着冷凍器を搭載することで、交互運転による連続冷却が可能である。

光学実験用クライオスタット (図 5 上) には低振動のパルスチューブ冷凍機を採用し、冷凍機ヘッドから 4 K ステージまでは高純度銅線を用いて熱伝達を行った。この構成で、光学実験のスペースを確保し、低振動環境および 0.8 K 吸着冷凍器の動作に必要な冷却性能 (100 mW@4 K) を実現した。光学実験用クライオスタットに搭載した吸着冷凍器から高純度銅線を介して 0.8 K ステージ上の SIS 光子検出器と 1 段目 SF 回路の冷却を行った (図 5 下)。SIS 光子検出器はシリコンの超半球レンズの裏面に接着し、超伝導マグネットによる磁場印加により超伝導電流を抑制する。クライオスタットの光学窓には、300 K に超高分子量ポリエチレン、60 K にブラックポリエチレン、4 K に吉永フィルターを採用し、いずれも反射防止加工を施すことで、光学効率 60% 以上を確保した。

強度干渉計の実証実験のため、図 6 に示す 2 素子強度干渉計を製作した。黒体光源と口径 600 mm の球面鏡 (R=4800 mm) とを用いて平行光を入射し、自動ステージ上の平面鏡の距離を制御することで基線長を 100-500 mm で調整できる。金属 3D プリントで製作した 3 面鏡および軸外し放物面鏡 2 組を介して 2 つの対向する窓からクライオスタット内に入射光を導入する。検出器として 600 GHz 帯の SIS 光子検出器を搭載し、極低温回路を用いて高速の信号検出を行う。これまでの光学実験で、黒体放射光源の信号を用いて、期待される感度が測定された。分光特性はサブミリ波帯フーリエ分光器を用いて測定し、660 GHz にピーク感度があることが確認された。広帯域の極低温読出し回路と SIS 光子検出器を 2 組用いた強度干渉計の実証実験を開始した。今後の課題として、測定データの取得とデータ解析により強度干渉計による画像合成に取り組む。

強度干渉計の実証実験と並行して、画像合成のシミュレーション結果を論文成果としてまとめた (Matsuo et al. 2020, SPIE 11443, 114431N)。振幅干渉計と強度干渉計の画像合成の精度について評価し、強度干渉計が位相揺らぎに対して安定な画像合成が可能なこと、遅延時間の測定精度を得るために高感度直接検出器の導入が必要なることを示した。

中国の紫金山天文台と協力して行った南極高地 (ドーム A) のデータ解析を進め、テラヘルツ帯の大気窓を通じた天体観測の可能性を明らかにした。その結果、電離窒素 [NII] 205  $\mu$ m が 1

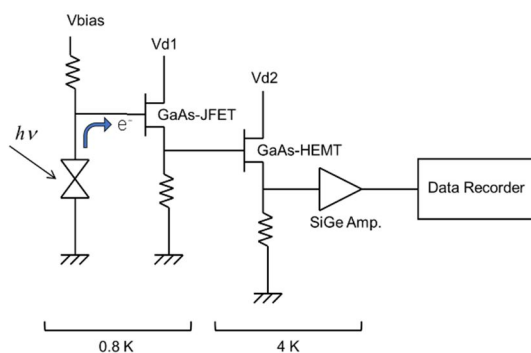


図 4. 極低温読出し回路の構成

200  $\mu$ W 負荷で 0.8 K ステージに設置する 1 段目 SF 回路 2 個分の

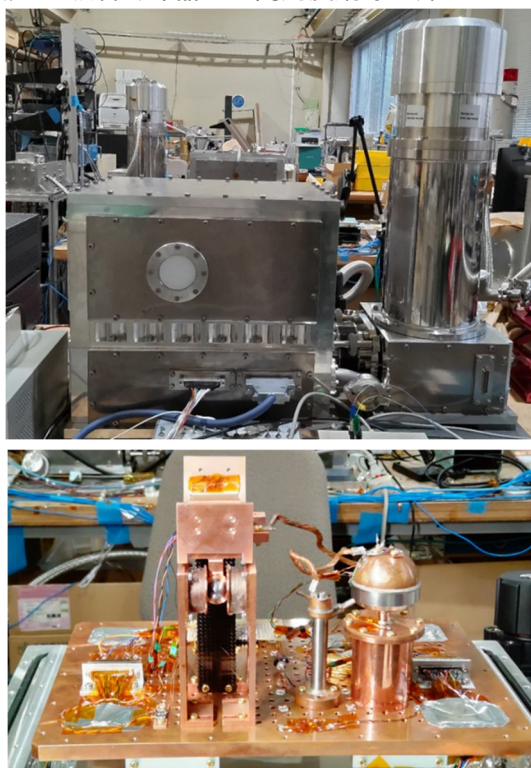


図 5. (上) 光学実験用クライオスタット、(下) クライオスタット内部の配置

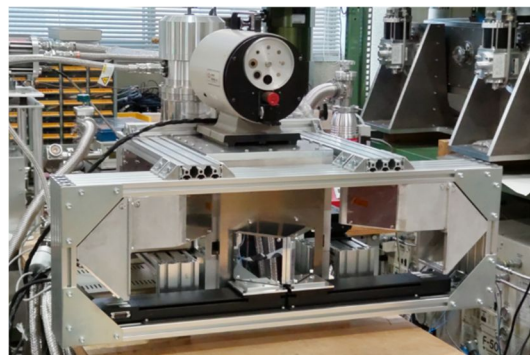


図 6. 強度干渉計光学システム

年を通して観測条件が良いこと、電離酸素 [OIII] 88  $\mu\text{m}$ , 52  $\mu\text{m}$  が冬期に観測可能なことを明らかにした (Matsuo et al. 2019, APS 30, 76)。

南極テラヘルツ強度干渉計の提案を行い、南極天文観測コンソーシアムから提案する極域研究第 X 期の一般観測研究「南極 30 cm サブミリ波望遠鏡による星間ガスの進化・星形成過程の解明」の中での開発課題と位置づけて計画を進めている。2024 年度に 30 cm 望遠鏡 1 号機がドームふじに到着し 500 GHz 帯での銀河面観測を開始し、2026 年度に 2 台目の 30 cm 望遠鏡と組み合わせたテラヘルツ強度干渉計を構成し、500 GHz 帯の SIS 受信機を用いて試験データを取得する計画である。その後、1.5 THz 帯の SIS 光子検出器を用いて天体観測を目指す、という提案をしている。

将来計画としては、宇宙空間からのスペーステラヘルツ強度干渉計として宇宙電波懇談会シンポジウムで提案し、スペース遠赤外線強度干渉計として光赤外線天文連絡会シンポジウムおよび 2040 年代のスペース将来計画研究会で議論を行った。将来の高解像度スペース干渉計技術として、フォーメーションフライトなどの技術的検討を開始している。

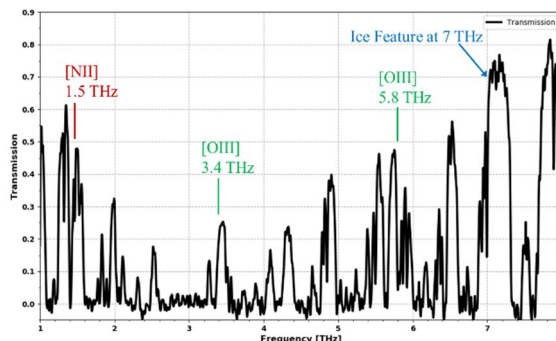


図 7. 南極高地(ドーム A)からの大気透過スペクトル (Matsuo et al. APS 30, 76)

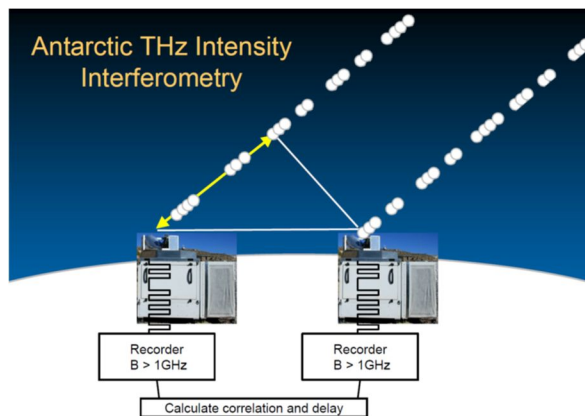


図 8. 南極ドームふじ基地に設置する 30 cm 望遠鏡 2 台で構成するテラヘルツ強度干渉計の概念図

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ren Yi W., Fudamoto Yoshinobu, Inoue Akio K., Sugahara Yuma, Tokuoka Tsuyoshi, Tamura Yoichi, Matsuo Hiroshi, Kohno Kotaro, Umehata Hideki, Hashimoto Takuya, Bouwens Rychard J., Smit Renske, Kashikawa Nobunari, Okamoto Takashi, Shibuya Takatoshi, Shimizu Ikkoh	4. 巻 945
2. 論文標題 Updated Measurements of [O III] 88 $\mu\text{m}$ , [C II] 158 $\mu\text{m}$ , and Dust Continuum Emission from a $z = 7.2$ Galaxy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 69 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acb8ab	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tokuoka Tsuyoshi, Inoue Akio K., Hashimoto Takuya, Ellis Richard S., Laporte Nicolas, Sugahara Yuma, Matsuo Hiroshi, Tamura Yoichi, Fudamoto Yoshinobu, Moriwaki Kana, Roberts-Borsani Guido, Shimizu Ikkoh, Yamanaka Satoshi, Yoshida Naoki, Zackrisson Erik, Zheng Wei	4. 巻 933
2. 論文標題 Possible Systematic Rotation in the Mature Stellar Population of a $z = 9.1$ Galaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L19 ~ L19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac7447	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takashi Hasebe, Tasuku Hayashi, Yoshinori Shohmitsu, Tom Nitta, Hiroshi Matsuo, Yutato Sekimoto	4. 巻 60
2. 論文標題 Fabrication of three-layer silicon antireflection structures in 200-450 GHz using deep reactive ion etching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 10462 ~ 10467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.441969	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuo Hiroshi	4. 巻 11443
2. 論文標題 Far-infrared intensity interferometry for high angular resolution imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 114431N(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562373	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ezawa Hajime, Matsuo Hiroshi, Ukibe Masahiro, Fujii Go, Shiki Shigetomo	4. 巻 200
2. 論文標題 Optical Performance of SIS Photon Detectors at Terahertz Frequencies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 226 ~ 232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02513-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuo Hiroshi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Development of Terahertz Intensity Interferometry for Very High Angular Resolution Observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 39 ~ 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21820/23987073.2020.5.39	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Matsuo, Shengcai Shi, Scott Paine, Qijun Yao, Zhenhui Lin	4. 巻 30
2. 論文標題 Terahertz atmospheric windows for high angular resolution terahertz astronomy from Dome A	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Polar Science	6. 最初と最後の頁 76-80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.13679/j.advps.2019.00076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ezawa Hajime, Matsuo Hiroshi, Ukibe Masahiro, Fujii Go, Shiki Shigetomo	4. 巻 194
2. 論文標題 Studies on Terahertz Photon Counting Detectors with Low-Leakage SIS Junctions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 426 ~ 432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02149-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto Takuya, Inoue Akio K, Tamura Yoichi, Matsuo Hiroshi, Mawatari Ken, Yamaguchi Yuki	4. 巻 71
2. 論文標題 Detections of [O III] 88 $\mu\text{m}$ in two quasars in the reionization epoch	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz094	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto T., Inoue A. K, Mawatari K., Tamura Y., Matsuo H., Furusawa H., Harikane Y., Shibuya T., Knudsen K. K., Kohno K., Ono Y., Zackrisson E., Okamoto T., Kashikawa N., Oesch P. A., Ouchi M., Ota K., Shimizu I., Taniguchi Y., Umehata H., Watson D.	4. 巻 71
2. 論文標題 Big Three Dragons: A $z = 7.15$ Lyman-break galaxy detected in [O III] 88 $\mu\text{m}$ , [C II] 158 $\mu\text{m}$ , and dust continuum with ALMA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto T., Laporte N., Mawatari K., Ellis R. S., Inoue A. K., Zackrisson E., Roberts-Borsani G., Zheng W., Tamura Y., Bauer F. E., Fletcher T., Harikane Y., Hatsukade B., Hayatsu N. H., Matsuda Y., Matsuo H., Okamoto T., Ouchi M., Pello R., Rydberg C.-E., Shimizu I., Taniguchi Y., Umehata H., Yoshida N.	4. 巻 557
2. 論文標題 The onset of star formation 250 million years after the Big Bang	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 392 ~ 395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-018-0117-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計54件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 小関知宏, 丹羽綾子, 江澤元, 松尾宏, 柴野比里菜, 長沼桐葉
2. 発表標題 強度干渉計実験に向けた光学系の開発
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 小関知宏, 丹羽綾子, 江澤元, 松尾宏, 柴野比里菜
2. 発表標題 テラヘルツ領域の観測に向けた強度干渉計の開発
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Ayako Niwa, Tomohiro Koseki, Rina Enohi, Norio Okada
2. 発表標題 Progress toward Antarctic Terahertz Intensity Interferometry
3. 学会等名 32nd IEEE International Symposium on Space THz Technology (ISSTT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hajime Ezawa, Hiroshi Matsuo, Go Fujii, Shigetomo Shiki, Ayako Niwa, Norio Okada, Mitsuhiro Fukushima
2. 発表標題 Design and Performance of the Terahertz Photon Counting System: Detectors and Cryogenics
3. 学会等名 32nd IEEE International Symposium on Space THz Technology (ISSTT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ayako Niwa, Hajime Ezawa, Tomonori Tamura, Hiroshi Matsuo
2. 発表標題 SIS photon detectors for THz observations beyond the gap energy
3. 学会等名 32nd IEEE International Symposium on Space THz Technology (ISSTT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Norio Okada, Ayako Niwa, Tomohiro Koseki, Rina Enohi
2. 発表標題 Laboratory Experiments on THz Intensity Interferometry
3. 学会等名 23rd East Asia Submillimeter-Wave Receiver Technology Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Nario Kuno, Masumichi Seta, Naomasa Nakai
2. 発表標題 Proposal of Terahertz Interferometry from Dome Fuji
3. 学会等名 10th SCAR Open Science Conference (SCAR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾 宏
2. 発表標題 遠赤外線干渉計についての考察
3. 学会等名 2040年代のスペース天文学研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾 宏、久野成夫、橋本拓也、中井直正、瀬田益道
2. 発表標題 テラヘルツ天体干渉計を実現するまでの課題
3. 学会等名 第18回南極設営シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo
2. 発表標題 Prospects of Space Terahertz Intensity Interferometry
3. 学会等名 Online Summit on Astrophysics and Space Research Chapter-2 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo
2. 発表標題 Space Terahertz Intensity Interferometry
3. 学会等名 International Union of Radio Science (URSI-GASS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Ryohei Noji, Tomohiro Koseki, Ayako Niwa
2. 発表標題 Cryogenic Readout Electronics for SIS Photon Detectors
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hajime Ezawa, Hiroshi Matsuo, Masahiro Ukibe, Go Fujii, Shigetomo Shiki, Ayako Niwa
2. 発表標題 Properties of SIS Devices for Terahertz Photon Detection
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo
2. 発表標題 Developments toward Photon Counting Terahertz Interferometry
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Week 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久野成夫, 新田冬夢, 橋本拓也, 齋藤弘雄, Dragan SALAK, 中井直正, 瀬田益道, 徂徠和夫, 永井 誠, 梅本智文, 松尾 宏
2. 発表標題 南極テラヘルツ望遠鏡計画
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ayako Niwa, Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Tomonori Tamura
2. 発表標題 SIS photon detector for THz observation beyond gap energy
3. 学会等名 22nd East Asia Submillimeter-wave Receiver Technology Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Koseki, Hiroshi Matsuo, Atsuhisa Terui, Ryouhei Noji
2. 発表標題 Development of cryogenic readout circuit for Photon Counting THz Interferometry
3. 学会等名 22nd East Asia Submillimeter-wave Receiver Technology Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Wenlei Shan, Yasuhiro Murata, Ayako Niwa
2. 発表標題 Development of far-infrared superconducting detectors for photon counting interferometry
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾宏
2. 発表標題 ESAの系外惑星干渉計計画と赤外線強度干渉計との関係
3. 学会等名 光赤天連シンポジウム「2030年代の戦略的中型をどうするのか」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丹羽綾子, 松尾宏, 江澤元, 田村友範
2. 発表標題 南極テラヘルツ強度干渉計搭載用1.5THz光子検出器の開発
3. 学会等名 第22回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 照井惇寿, 松尾宏, 小関知宏
2. 発表標題 テラヘルツ光子計数型検出器の開発に向けた回路作成
3. 学会等名 第22回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丹羽綾子, 松尾宏, 江澤元, 田村友範
2. 発表標題 テラヘルツ強度干渉計のための1.5THz光子計数型検出器の設計
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小関知宏, 松尾宏, 照井惇寿, 野地涼平
2. 発表標題 光子計数型テラヘルツ強度干渉計のための極低温読み出し回路の開発
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾宏
2. 発表標題 南極活動の新しい方向性-将来のスペースとのリンク
3. 学会等名 極地研研究会「南極から遠赤外線-テラヘルツ波で探る宇宙」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丹羽綾子, 松尾宏, 江澤元, 田村友範, 小関知宏
2. 発表標題 NII[205 um]輝線をターゲットとした南極テラヘルツ強度干渉計試験観測計画
3. 学会等名 TChoUワークショップ南極部門
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ayako Niwa, Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Tomonori Tamura
2. 発表標題 1.5 THz photon counting detectors for Antarctic THz Intensity Interferometry
3. 学会等名 TCHoU Workshop, Photon & Particle Detectors Division
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾宏, 江澤元, 鎌崎剛, 新田冬夢, 橋本拓也, 丹羽綾子, 久野成夫, 瀬田益道, 中井直正
2. 発表標題 南極テラヘルツ干渉計による原子輝線の観測計画
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丹羽綾子, 松尾宏, 江澤元, 福嶋美津広, 岡田則夫, 森野潤一, 黒澤里沙, 守屋潤一郎
2. 発表標題 テラヘルツ強度干渉計用光子計数型検出器のための 0.8 K 小型吸着式冷凍器 の開発
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾宏
2. 発表標題 南極テラヘルツ干渉計の実現に向けて
3. 学会等名 ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾宏
2. 発表標題 Technologies for Space Infrared Intensity Interferometry
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾宏
2. 発表標題 テラヘルツ光子計数型干渉計の究極性能
3. 学会等名 宇電懇シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo
2. 発表標題 Far-infrared intensity interferometry for high angular resolution imaging
3. 学会等名 SPIE 11443 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Hitoshi Kiuchi, Mareki Honma, Masahiro Ukibe, Go Fujii, Yasuhiro Murata, Makoto Hattori
2. 発表標題 Technologies for space terahertz intensity interferometry
3. 学会等名 SPIE 11453 (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Ayako Niwa, Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Mitsuhiro Fukushima, Norio Okada, Jun-ichi Morino, Risa Kurosawa, Junichiro Moriya
2. 発表標題 Development of Compact 0.8 K Sorption Coolers for THz Photon Counting Detectors
3. 学会等名 East Asia Submillimeter-wave Receiver Technology Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹羽綾子, 松尾宏, 江澤元, 福嶋美津広, 岡田則夫, 森野潤一, 黒澤里沙, 守屋潤一郎
2. 発表標題 テラヘルツ光子計数型検出器のための0.8K 小型吸着式冷凍器の評価
3. 学会等名 日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹羽綾子, 松尾宏, 江澤元, 福嶋美津広, 岡田則夫, 森野潤一, 黒澤里沙, 守屋潤一郎
2. 発表標題 テラヘルツ光子計数型検出器のための0.8 K 小型吸着式冷凍器の開発
3. 学会等名 第9回可視赤外線観測装置技術ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松尾宏
2. 発表標題 スペース赤外線強度干渉計
3. 学会等名 光赤天連シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Ryohei Noji, Saho Kawahara
2. 発表標題 Development of readout electronics for SIS photon counting detectors
3. 学会等名 31st IEEE International Symposium on Space Terahertz Technology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo
2. 発表標題 Proposal of Space Terahertz Intensity Interferometry
3. 学会等名 Space VLBI 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo
2. 発表標題 Progress on the Development of Terahertz Intensity Interferometry
3. 学会等名 The 20th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technology in Eastern Asia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa
2. 発表標題 Fast readout cryogenic electronics for SIS photon detectors
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Ezawa, Hiroshi Matsuo, Masahiro Ukibe, Go Fujii, Shigetomo Shiki
2. 発表標題 Optical Performance of SIS Photon Detectors at Terahertz Frequencies
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detectors
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Sheng-Cai Shi, Scott Paine, Qi-Jun Yao, Zhen-Hui Lin
2. 発表標題 Prospects of High Angular Resolution Terahertz Astronomy from Antarctica
3. 学会等名 30st International Symposium on Space Terahertz Technology
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo
2. 発表標題 Quantum Behavior of Terahertz Photons and its Applications
3. 学会等名 The 7th Annual Conference of AnalytiX-2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松尾 宏, 江澤 元, 野地涼平, 河原沙帆
2. 発表標題 テラヘルツ強度干渉計を実現する極低温回路技術の開発
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江澤 元, 松尾 宏, 浮辺雅宏, 藤井 剛, 志岐成友, 河原沙帆
2. 発表標題 テラヘルツ光子計数システムの実現に向けたSIS検出器の開発-II
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松尾 宏
2. 発表標題 スペース赤外線強度干渉計
3. 学会等名 2019年度光赤天連シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo
2. 発表標題 Future of Radio Astronomy Instruments
3. 学会等名 Nobeyama Sceince Workshop
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松尾 宏, 江澤 元, 木内 等, 本間希樹, 村田泰宏, 浮辺雅宏, 藤井 剛, 服部 誠
2. 発表標題 テラヘルツ光子の統計を用いた天体観測手法の開拓
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 江澤 元, 松尾 宏, 浮辺雅弘, 藤井 剛, 志岐成友
2. 発表標題 テラヘルツ光子計数システムの実現に向けたSIS検出器の開発
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Ezawa, Hiroshi Matsuo, Masahiro Ukibe, Go Fujii, Shigetomo Shiki
2. 発表標題 Photon Counting Detectors for Terahertz Astronomy with SIS junctions
3. 学会等名 19th East Asia Sub-millimeter-wave Receiver Technology Workshop / 5th Riken-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Sheng-Cai Shi, Scott Paine, Qijun Yao, Zhenhui Lin
2. 発表標題 Atmospheric Windows from Dome-A Antarctica for High Angular Resolution Terahertz Astronomy
3. 学会等名 OSA Light, Energy and the Environment Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo, Hajime Ezawa, Masahiro Ukibe, Go Fujii, Shigetomo Shiki
2. 発表標題 Terahertz Photon Counters for HBT Intensity Interferometry
3. 学会等名 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Matsuo
2. 発表標題 A Roadmap for Far-Infrared and Terahertz Interferometry
3. 学会等名 XXXth General Assembly of the International Astronomical Union (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中井直正、坪井昌人、福井康夫、松尾宏(5.5章 サブミリ波直接検出器)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 日本評論社	5. 総ページ数 392
3. 書名 宇宙の観測II 電波天文学 [第2版]	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	江澤 元 (Ezawa Hajime)  (60321585)	国立天文台・アルマプロジェクト・助教  (62616)	
研究分担者	藤井 剛 (Fujii Go)  (30709598)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員  (82626)	
研究分担者	浮辺 雅宏 (Ukibe Masahiro)  (00344226)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究グループ長  (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	木内 等  (Kiuchi Hitoshi)		
研究協力者	本間 希樹  (Honma Mareki)		
研究協力者	村田 泰宏  (Murata Yasuhiro)		
研究協力者	丹羽 綾子  (Niwa Ayako)		
研究協力者	小関 知宏  (Koseki Tomohiro)		
研究協力者	岡田 則夫  (Okada Norio)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関