

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02872

研究課題名(和文)集積型ミリ波サブミリ波6色同時撮像カメラの開発

研究課題名(英文)Development of six color millimeter/submillimeter camera using integrated detector technology

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：サブミリ波銀河と呼ばれる初期宇宙の爆発的星形成銀河や宇宙最大の天体である銀河団をミリ波サブミリ波帯で観測することは、宇宙の構造や化学的な進化を理解することにつながる。特に本研究では、従来は難しかった広い周波数帯域を同時に観測することができるミリ波サブミリ波のカメラの基幹技術である「集積型」の超伝導検出器の開発やカメラの光学素子に要求される超広帯域な反射防止技術の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、ミリ波サブミリ波天文学の情報量が特に周波数方向で大きく増えることにつながり、銀河や銀河団の観測はもちろんのことより広い種類の天体の観測にも役立つことが考えられる。また、本研究で得られたミリ波サブミリ波帯の技術は天文観測の発展だけでなく、次世代の社会基盤への応用も期待される。例えば、ミリ波帯通信技術との親和性の高さから、本研究で得られた材料の光学特性、および検出器や光学素子の様々な設計手法を通信技術へ応用可能である。また、超伝導回路技術や極低温でのギガヘルツ帯の信号伝送技術が量子コンピュータの周辺技術として活用可能である。

研究成果の概要(英文)：Observation of star-forming galaxies in the early universe, called submillimeter galaxies, and clusters of galaxies, the largest objects in the universe, in the millimeter-submillimeter wave band will help us understand the structural and chemical evolution of the universe. In particular, this research has developed an "integrated" superconducting detector, which is a key technology for millimeter/submillimeter-wave cameras that can simultaneously observe a wide frequency band, which has been difficult to achieve in the past, and an ultra-broadband anti-reflection technology required for the optical elements of the camera.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 テラヘルツ技術 超伝導検出器 超伝導フィルター 反射防止コーティング メタマテリアル

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年 JCMT, ASTE, SPT, APEX 等のサブミリ波望遠鏡に搭載された SCUBA, AzTEC, LABOCA, SCUBA-2 等のミリ波やサブミリ波の連続波カメラによる広域サーベイ観測は、これまでダストに隠されて観測ができなかった銀河宇宙の新たな姿をもたらした。サブミリ波銀河と呼ばれる初期宇宙の爆発的星形成銀河の発見(Hughes et al. 1998, Nature, 391, 651)、1,400 個を超えるサブミリ波銀河の発見や集団化の定量(Tamura et al. 2009, Nature, 459, 61; Hatsukade et al. 2011, MNRAS, 411, 102)、赤方偏移 5 を超える銀河候補の特定(Ikarashi et al. 2015, ApJ, 810, 133)、400 個以上の新たな SZ 銀河団の発見(Bleem et al. 2015, ApJS, 216, 27) など、その成果は枚挙に暇が無い。特に、ミリ波サブミリ波観測は、Herschel 衛星等による遠赤外線観測と比較して、赤方偏移 3 を超える時代にまで感度を有するという強力な利点がある。現代天文学のフロンティアである宇宙再電離期(赤方偏移で 6-9 の時代)まで遡り、銀河の形成・進化、ダスト形成、大規模構造の形成等を理解する上で、ミリ波サブミリ波観測により宇宙初期の星形成活動を明らかにすることが急務になっている。

一方で、ミリ波サブミリ波での観測では、見かけの明るさが銀河までの距離に依存しないため、1 波長(単色)だけの観測では、検出した銀河の距離推定が難しい。特にダストによる星間減光の激しいサブミリ波銀河では、可視光等での対応天体を手がかりにした赤方偏移推定は困難であるが、その代わりにミリ波サブミリ波の多波長(多色)観測に基づく赤方偏移推定が極めて有効に働く(Tamura et al. 2015, ApJ, 808, 121)。こうして得られたサブミリ波銀河の赤方偏移分布は、宇宙再電離期に至る隠された星形成を初めて明らかにするだけでなく、暗黒物質に支配された構造形成の端緒として生じる「原始」銀河団を特定する上で、大変有効である(Umehata et al. 2014, MNRAS, 440, 3462 & 2015 ApJL, 815, 8; Tamura et al. 2010, ApJ, 724, 1270 & 2013, MNRAS, 430, 2768)。こうした初期宇宙の「原始」銀河団が、いかに現在の宇宙における銀河団へと進化してきたか、その形成過程を調べることも重要な課題である。近年、ミリ波帯での SZ 効果を使った銀河団観測が進み、X 線観測と組み合わせることで、銀河団中に 20keV を超える極めて高温の内部構造が発見され、衝突合体しながら進化する銀河団の動的な描像が明らかになってきた(Kitayama et al. 2004, PASJ, 56, 17)。このような高温領域では SZ 信号に相対論的および非熱的な効果が顕著に現れ、ミリ波サブミリ波に渡る多色の観測によって同定することが可能になる(Bernardis et al. 2012, A&A, 538, A86)。特に、最近の Planck 衛星等による低空間分解能(数分角)でのサーベイ観測で発見された膨大な銀河団サンプルに基づき、ミリ波サブミリ波に渡る多色かつ地上望遠鏡の空間分解能(数十秒角)の観測で内部構造まで分解して調べていくことが銀河団の動的進化の解明、および、銀河団を用いた宇宙論パラメータ推定に与える系統誤差を把握する上で期待されている。

2. 研究の目的

世界的にミリ波サブミリ波連続波カメラの開発が進められる中、我々は一早く多色化に注目して、ASTE 望遠鏡の 8 分角の視野を埋める 270/350GHz 帯 2 色カメラの開発を進め(Oshima et al. 2013; Hirota et al. 2013; Takekoshi et al. 2012)、天体観測を実現した。本研究では、この 2 色カメラを拡張して最大 6 色のカメラを実現する基幹技術を確認することを目標とする。

3. 研究の方法

これまでの 270/350GHz 帯 2 色カメラでは、ダイクロイック鏡(入射した信号を高周波側と低周波側に分離する光学素子)により入射ビームを高周波側と低周波側の 2 周波数帯(270,

350GHz)に分割して、それぞれの焦点面に置いた超伝導検出器アレイで受信する構成である。この方法では、1 mを越える大型の冷却デュアーでさえ焦点面は2つしか取れないため、これまでの単色の検出器アレイを使用する限り、同時に取り得る色数(波長の数)は2色が限界である。本研究では、この既存の2色カメラを最大限活用し、各焦点面に設置する3色を同時に検出器可能な「集積型」多色超伝導検出器を開発する。加えて、多色化によって光学素子に要求される帯域が大幅に広がるため、超広帯域な反射防止技術および各3色検出器の観測帯域外の放射をカットする広帯域の光学フィルターの開発も合わせて行う。

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) 電磁界解析と回路シミュレーションを組み合わせた手法を新たに開発することで、将来の焦点面の大型化に適した単層平面型のCPW(コプレーナ)型のインダクタとキャパシタを組み合わせた8次のバンドパスフィルターの設計に成功し集積型3色検出器を製作できた(図1)。

併せて望遠鏡搭載時の光学系に合わせた実験室光学系と組み合わせ検出器の分光特性測定が可能な広視野のフーリエ分光器の整備を進めた。超伝導検出器の光学特性の測定例を図1に示す。

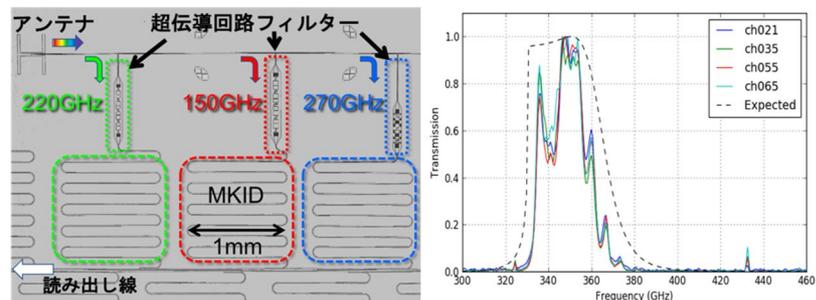


図 1: (左)検出器チップ上に実装された集積型超伝導回路フィルターによる3色検出器。(右)広視野フーリエ分光器を用いた光学特性測定系による超伝導検出器(光学フィルターを含む)の周波数特性の例。

(2) 連続波カメラの真

空窓やレンズなどの光学素子に用いる材料である UHMWPE(超高分子量ポリエチレン)に施す反射防止コーティングに必要な低屈折率のフィルムの探索・光学特性評価・データベース構築を行い、新たに開発した効率的な設計・製作手法と組み合わせることで、5層で目標とする全観測帯域をカバーする比帯域が約6の超広帯域反射防止コーティングを実現した(図2)。

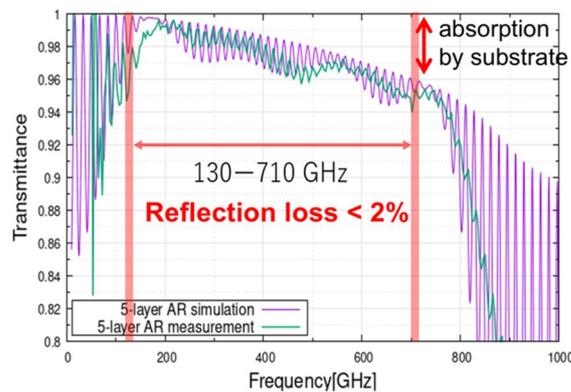


図 2: 5層からなる超広帯域反射防止コーティングを施した UHMWPE 基板の透過特性

(3) 産業界で近年発展著しいフレキシブルプリント基板(FPC)技術に着目することで、新たに安価かつ簡便にメタルメッシュ型光学フィルターを実現する方法を考案した。また、ここにおいても電磁界解析と回路シミュレーションを組み合わせた効率的な最適解の探索手法を確立し、3層の基板を積層することによって、それぞれの焦点面の3色検出器の帯域に合わせた広帯域かつ中程度に急峻なカットオフを持つ帯域外除去バンドパスフィルターを得ることができた(図3)。

こうした開発的成果に加えて、将来的な多色カメラの線型性キャリブレーションを行うための

多温度キャリブレーションの開発も併せて行った。地上からのサブミリ波観測では、検出器への入力負荷のうち大気からの熱輻射が支配的な上に、その強度が周波数によって大きく異なることや時々刻々と変動するため、多色化によって広い周波数帯を観測する際には、広いダイナミックレンジを持ったキャリブレーションが必要になる。そこで、実験室で校正した厚さの異なる吸収型グレーボディ（ポリスチレン）を複数組み合わせた8温度キャリブレーション装置を考案し、これを2色カメラと組み合わせてASTE 望遠鏡に搭載し、ミリ波やサブミリ波で必要な広いダイナミックレンジを確保できていることを確認した(Takekoshi et al. 2018; Oshima et al. 2018)。これにより、多色観測のキャリブレーションの準備をすることができた。

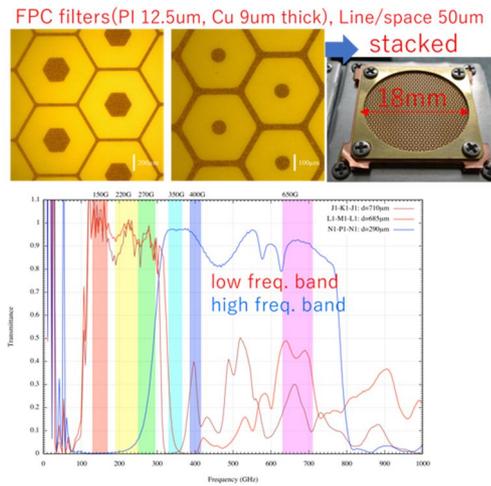


図 3: フレキシブルプリント基板技術を用いて作成したメタルメッシュ型バンドパスフィルターとそのバンド特性 (Uno et al. 2020)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Uno Shinsuke, Takekoshi Tatsuya, Oshima Tai, Yoshioka Keisuke, Wuy Chin Kah, Kohno Kotaro	4. 巻 59
2. 論文標題 Demonstration of wideband metal mesh filters for submillimeter astrophysics using flexible printed circuits	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 4143 ~ 4150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.389605	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 Zhang Y., Li H.-B., Luhr D., Takekoshi T., Oshima T., Gu Q.	4. 巻 59
2. 論文標題 Atacama sub-millimeter telescope experiment polarimeter (APol) I: design and lab-test result	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 2593 ~ 2599
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.378008	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 Oshima Tai, Ohtawara Kazushige, Takekoshi Tatsuya, Ishii Shun, Izumi Natsuko, Izumi Takuma, Yamaguchi Masayuki, Suzuki Shunta, Muraoka Kazuyuki, Hirota Akihiko, Saito Fumiaki, Nakatsubo Shunichi, Kouchi Akira, Ito Tetsuya, Uemizu Kazunori, Fujii Yasunori, Tamura Yoichi, Kohno Kotaro, Kawabe Ryohei	4. 巻 193
2. 論文標題 Development of Multi-temperature Calibrator for the TES Bolometer Camera: Deployment at ASTE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 996 ~ 1002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-2009-x	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 Takekoshi Tatsuya, Ohtawara Kazushige, Oshima Tai, Ishii Shun, Izumi Natsuko, Izumi Takuma, Yamaguchi Masayuki, Suzuki Shunta, Muraoka Kazuyuki, Hirota Akihiko, Saito Fumiaki, Nakatsubo Shunichi, Kouchi Akira, Ito Tetsuya, Uemizu Kazunori, Fujii Yasunori, Tamura Yoichi, Kohno Kotaro, Kawabe Ryohei	4. 巻 193
2. 論文標題 Development of Multi-temperature Calibrator for the TES Bolometer Camera: System Design	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1003 ~ 1009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-1916-1	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 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Kah Wuy Chin, Tai Ohshima, Satoshi Ono, Takeshi Sakai, Tatsuya Takekoshi, Satoru Mima, Ryohei Kawabe, Masato Naruse, Keisuke Yoshioka, Shinsuke Uno
2. 発表標題 Design of On-chip Broadband Band Selection Filter for Multi-chroic mm/submm Camera
3. 学会等名 30th International Symposium on Space Terahertz Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsuke Uno, Tatsuya Takekoshi, Kah Wuy Chin, Kotaro Kohno, Tai Oshima, Keisuke Yoshioka
2. 発表標題 Development of mm/submm Frequency Selective Filters made with FPC Fabrication Technology
3. 学会等名 30th International Symposium on Space Terahertz Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tai Oshima, Keisuke Yoshioka, Tatsuya Takekoshi, Kah Wuy Chin, Shinsuke Uno, Takeshi Sakai
2. 発表標題 Development of mm/submm broadband anti-reflection coating exploiting the various expanded PTFEs measured with THz-TDS
3. 学会等名 30th International Symposium on Space Terahertz Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇野慎介, 竹腰達哉, 陳家偉, 河野孝太郎, 大島泰, 吉岡佳輔
2. 発表標題 多色連続波カメラ用FPC広帯域バンドパスフィルターの多段パターン最適化
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長沼桐葉, 吉岡佳輔, 酒井剛, 大島泰, 竹腰達哉, 丹羽佑果, 宇野慎介, 陳家偉, 井上修平
2. 発表標題 多色サブミリ波カメラ用多段型多孔質膜赤外線フィルターの開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大島泰, 竹腰達哉, 陳家偉, 宇野慎介, 井上修平, 長沼桐葉, 丹羽佑果
2. 発表標題 超広視野時代のサブミリ波連続波観測の大気放射の除去について
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 竹腰達哉, 李建鋒, 陳家偉, 宇野慎介, 井上修平, 長沼桐葉, 丹羽佑果, 藤田和之, 香内晃, 中坪俊一, 美馬覚, 大島泰
2. 発表標題 超伝導検出器焦点面に適した低熱収縮シリコンアルミ合金の極低温特性評価
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 長沼桐葉, 吉岡佳輔, 酒井剛, 大島泰, 竹腰達哉, 丹羽佑果, 宇野慎介, 陳家偉, 井上修平
2. 発表標題 多色サブミリ波カメラ用超広帯域反射防止技術の開発
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 宇野慎介, 陳家偉, 井上修平, 河野孝太郎, 大島泰, 竹腰達哉, 長沼桐葉, 丹羽佑果
2. 発表標題 多色サブミリ波カメラ用超広帯域準光学バンドパスフィルターの開発
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 Tatsuya Takekoshi, Kianhong Lee, Kah Wuy Chin, Shinsuke Uno, Toyo Naganuma, Shuhei Inoue, Yuka Niwa, Kazuyuki Fujita, Akira Kouchi, Shunichi Nakatsubo, Satoru Mima, Tai Oshima
2. 発表標題 Material properties of a low contraction and resistivity silicon-aluminum alloy for cryogenic 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 宇野慎介, 竹腰達哉, 陳家偉, 河野孝太郎, 大島泰, 吉岡佳輔
2. 発表標題 FPC 製造技術を用いたミリ波サブミリ波帯周波数選択フィルターの開発
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳家偉, 竹腰達哉, 宇野慎介, 河野孝太郎, 大島泰, 川邊良平, 小野哲, 吉岡佳輔, 酒井剛, 成瀬雅人, 美馬覚
2. 発表標題 半導体基板上に実現するオンチップ広帯域バンドパスフィルターの設計
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chin, K. W., Oshima, T., Ono, S., Sakai, T., Takekoshi, T., Mima, S., Kawabe, R., Naruse, M., Yoshioka, K., Uno, S.
2. 発表標題 Compact On-chip Wideband Bandpass Filter Design for Millimeter/Submillimeter Wave Multichroic Camera
3. 学会等名 International Workshop on Far-Infrared Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takekoshi, T., Terasaki, T., Chin, K. W., Yoshioka, K., Oshima, T., Matsuo, H.
2. 発表標題 FTS Measurement System for the Multi-chroic mm/submm Camera
3. 学会等名 The 19th EA Sub-mm-wave Receiver Technology Workshop and the 5th Riken-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshioka, K., Sakai, T., Oshima, T., Takekoshi, T., Chin, K. W.
2. 発表標題 Building a submillimeter optical property database based on precision measurement using THz-TDS
3. 学会等名 The 19th EA Sub-mm-wave Receiver Technology Workshop and the 5th Riken-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Uno, S., Takekoshi, T., Chin, K. W., Kohno, K., Yoshioka, K., Oshima, T.
2. 発表標題 Development of mm/submm Frequency Selective Filters made with FPC Fabrication Technology
3. 学会等名 The 19th EA Sub-mm-wave Receiver Technology Workshop and the 5th Riken-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tai Oshima
2. 発表標題 Development of multi-color mm/sub-mm Camera in NAOJ
3. 学会等名 International Workshop on Submillimeter Astronomy (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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
研究協力者	竹腰 達哉 (Takekoshi Tatsuya)		

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
---------	---------