

平成22年 5月31日現在

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2007～2009

課題番号：19684003

研究課題名(和文) サブミリ連続波観測のための大規模 TES ボロメータアレイの開発

研究課題名(英文) Development of TES bolometer array for submillimeter continuum observation

研究代表者

大島 泰 (OSHIMA TAI)

国立天文台・野辺山宇宙電波観測所・助教

研究者番号：40450184

研究成果の概要(和文)：

宇宙の構造進化を理解するには、遠方の銀河団及びその形成現場である大規模構造に沿った原始銀河からの放射の観測が必要であり、そのためにはサブミリ波帯での広い領域に渡る詳細な観測が重要である。そこで、サブミリ波帯での高感度な観測を実現するために、超伝導薄膜技術を用いた極低温検出器である TES ボロメータの多画素アレイ検出器の開発を詳細な設計に基づいて行い、多画素アレイを効率よく読み出すことに成功した。

研究成果の概要(英文)：

To reveal the cosmic structure formation, realization of wide field and sensitive submillimeter wavelength observations of distant galaxy clusters and protogalaxies along the large scale structure is required. Therefore, development of a sensitive large array cryogenic detector utilizing superconducting transition edge sensor "TES bolometers" was conducted and the array detector was successfully readout by efficient multiplexing method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2008年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	19,500,000	5,850,000	25,350,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：電波天文学、ボロメータ

## 1. 研究開始当初の背景

銀河団は、宇宙の構造進化の良いトレーサーである。その形成の現場を捉えるにはサ

ブミリ波帯にある Sunyaev-Zel'dovich(SZ) 効果の観測が注目されている(Carlstrom et al. 2002)。さらに、銀河団が形成され始め

る赤方偏移  $z \sim 3$  の時代には、大規模構造に沿って密度の高い領域に星形成が活発な原始銀河が形成され、その放射がサブミリ波帯に現れることが理論的に予測されている (Governato et al. 1998)。つまり、サブミリ連続波によって初めて、銀河団の形成史をその誕生の瞬間から一貫して議論できるようになるのである。さらには、原始銀河と近傍銀河とを比較することで星形成の歴史に迫れるという意味でも意義は大きい。

原始銀河や銀河団の SZ 効果からの微弱なシグナルを捉えるには、大規模構造の典型的なスケールである一辺 0.2 度角以上の視野を感度にして 1mJy の深さでマッピングする必要がある。つまり、1) 大きな口径と優れた鏡面精度を併せ持つ望遠鏡と 2) 広視野をカバーする高感度な撮像型の検出器の両方が要求されるのである。ところが、従来の検出器では望遠鏡の全視野をカバーできないため、これまでサブミリ波帯で最も成功した英国の半導体ボロメータ SCUBA をもってしても観測に数年はかかる。1) に対しては、サブミリ波の観測に最適なチリの高地に設置された望遠鏡の中でも、私が主要メンバーとして推進している ASTE 望遠鏡は、10m の大口径と鏡面精度  $18.9 \mu\text{m}$  を併せ持ち、現在稼動している中では世界最高レベルのサブミリ波望遠鏡である (Ezawa et al. 2004)。さらに、2) に対しては、ASTE 望遠鏡の 7.5 分角という広視野を完全にカバーできる 100 画素を超える TES ボロメータアレイが完成すれば、SCUBA の 20 倍以上のマッピングスピードが得られる。よって、100 画素を超える TES ボロメータアレイの実現が望まれている。

## 2. 研究の目的

サブミリ連続波によるサーベイ観測は、遠方の銀河や銀河団探査の最も有効な手法として注目され、そのための広視野の撮像能力を持つ検出器開発が世界中で始まっている。中でも、最高の感度と高い撮像性能が実現できると期待されている検出器がボロメータである。ボロメータは、入射エネルギーフラックスによる素子の温度上昇を測定する低温検出器である。しかし、これまでの半導体温度計を用いたボロメータは 1 画素ずつ手作業で作成されてきたため、アレイの製作が困難であった。また、多画素を同時に読み出す低ノイズのマルチプレクス技術がなく、画素個々の読み出しが必要であった。そのため、大量の配線と読み出し素子の数と冷凍機サイズの制約から 100 画素程度が限界であった。従って、これをモジュールとしてさらなる大規模のアレイを実現するという発展性は持たなかった。さらに、感度も既に理論的境界に達してこれ以上の向上が見込めないでい

た。ところが、最近になって登場したのが TES ボロメータである。TES (Transition Edge Sensor) とは、超伝導遷移端での抵抗値の急峻な温度変化を用いた温度計であり、従来よりも高い感度を持つ。さらに、TES の最大の強みは、これまでの低温検出器の常識を覆すアレイ化への適合性である。具体的には、マルチプレクス技術が確立している低ノイズの電流計である SQUID (超伝導量子干渉計) で読み出せることと半導体製造プロセスとの高い親和性によって多画素が一度に製作できることである。これによって 100 画素以上の大規模アレイが一気に現実のものとして考えられるようになった。それゆえに現在、様々な波長でアレイの製作が試みられている。しかし、日本ではこれまでサブミリ波用の TES ボロメータの開発は行われて来なかった。よって本研究では、サブミリ波用の TES ボロメータアレイを早期に実現することで、日本にその技術を樹立し、将来のさらなる大規模化のための基礎技術とすることを目指す。

## 3. 研究の方法

TES ボロメータは、シリコン基板上に形成され、吸収体、TES としての超伝導薄膜、入射熱を熱浴に逃がすための熱リンクから構成され、その信号出力は電流として SQUID (超伝導量子干渉計) 素子とそのマルチプレクス回路で読み出す。の開発項目は、TES 温度計の成膜と特性評価、SQUID の評価、TES と SQUID を組み合わせたボロメータとしての熱入力に対する応答の評価から成り立つ。また、極低温検出器であるため、冷却系の整備も要求される。それぞれ以下の方法で開発を行う。

TES の成膜および効率の良い TES 評価システムの構築を行い、TES 温度計としての評価を行う。本研究では、開発のスピードを重んじるため、技術的なハードルを下げる工夫を行う。そのためには、100 画素を一枚のシリコン基板上に製作するのではなく、歩留まりの観点から現実的な数に分割することが最も有効である。そこで、本研究では 55 画素を単位ユニットとして複数並べることで比較的容易に 100 画素以上を実現する基礎とする。

冷却系には、実際の使用環境である、無冷媒の機械式冷凍機による冷却を実現する。特に、ボロメータは熱ひいては振動に感度が高いために、機械式冷凍機の振動がノイズ源となる。そこで、比較的振動の小さいパルスチューブ冷凍機を使用した上で、低温での材料の特性を活用し、熱と振動の切り分けを行う。また、低温検出器は冷却に大きな労力を払う

にも関わらず、限られた測定時間しか得られない。従って、まずは、冷却サイクルを自動化する。その上で、1回の冷却で測定できる項目の数を増やして冷却の回数を減らして効率化を図る。特に、素子数が増大すると共にこの傾向は顕著になる。

低温検出器の読み出しの配線数や素子数は冷凍機の冷凍能力で限られ、1つの読み出し素子で複数の画素を読み出すマルチプレクス技術が必須である。本開発では、これまで私が開発に関わってきた、個々の TES ボロメータ素子をそれぞれ異なる数百 kHz の高周波でバイアスすることで特徴づけて区別する周波数分割方式を採用する。さらに、日本で初めて SQUID を用いた TES ボロメータの読み出しを実現した (Oshima et al. 2001) 経験に基づいて複数の SQUID を用いたシステムの構築を行う。特に、磁場に非常に感度が高い SQUID にとって最も重要である磁気シールドの設計は、有限要素法を用いた磁場のシミュレーションによって行う。

#### 4. 研究成果

ボロメータは、極低温に冷却する必要がある一方で、振動に非常に敏感なため、振動を発生する機械式冷凍機を用いる際には熱接触と振動抑制の相反する条件をクリアする必要がある。そこで、振動抑制と良好な熱接触を両立するために、ベローズと防振ゴムを用いた防振構造を作り、さらに、線材を用いて振動の伝導を抑制した。特に、極低温では材料の純度が電気伝導率ひいては熱伝導率を左右する性質を踏まえて、この線材には、高純度 (6N) の銅線の束を用いることで高い熱伝導率を保つことができた。さらに、ソフトウェアを用いて、冷却サイクル及び、TES の特性である温度-抵抗の測定と、ボロメータとしての温度-電流特性の測定を自動化した。

TES ボロメータの読み出し素子である SQUID (超伝導量子干渉計) は外部磁場に非常に感度が高いため、地磁気の 1/100 以下の極小磁場環境が必要である。そこで、SQUID 素子の下に磁場を通さない超伝導材料のニオブ箔を敷いた上で、このニオブ箔が超伝導になるまでの間の磁気遮蔽として、低温でも特性の変化の少ない高透磁率材料クライオパームで製作した磁気シールドで覆った (図 1)。これによって、SQUID を安定して動作させることに成功した (図 1)。

サブミリ波用 TES ボロメータの構造のスケールは、従来作られてきたミリ波用とも比べて小さく、製造プロセスによる制限が無視できなくなる。従って、その条件を考慮した上で、ボロメータの性能を決める、熱特性と光学特性の設計が不可欠になる。そこでまず、

ボロメータの最適化に必要な大気からの熱ロードについて、既存のボロメータの観測データを系統的にかつ詳細に解析することによって、大気の状態の変動によるボロメータの応答の大きさを明らかにした。これを考慮した熱のモデリングは有限要素法を用いて行い、熱応答の最適化を行った (Oshima et al. (2007), Oshima et al. (2008))。さらに、

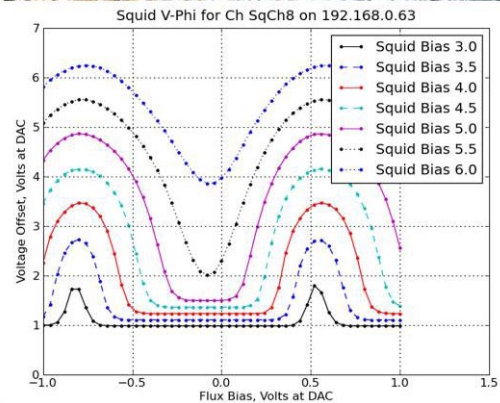
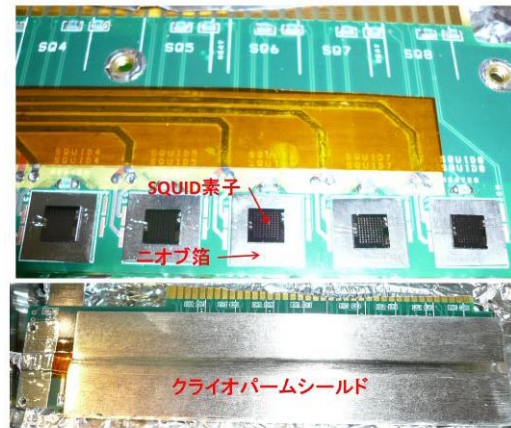


図 1 (上) SQUID 素子とニオブ箔による磁気遮蔽。(中)これを覆うクライオパームによる磁気シールド。(下)磁気シールド環境下で安定して得られた SQUID の入力電圧 (横軸) に対する出力電圧 (縦軸) の特性。

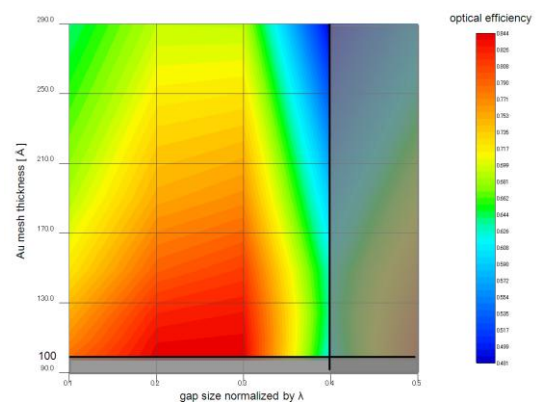


図 2 吸収体の光学的な吸収効率の構造スケール (横軸) と吸収体の厚さ (縦軸) への依存性。

TES ボロメータの性能として重要な周波数バンド内での輻射の吸収効率を最大にするため、光学的なカップリングの最適化を行った。特に、輻射の吸収を行う吸収体の最小の構造スケールとインピーダンス(厚さに逆比例)とがトレードオフの関係にあるため、ボロメータ製作プロセスの許す範囲内で理論的にパラメータを絞り込んだ上で、有限要素法を用いた詳細な電磁界数値シミュレーションを行って最適解を探索した(図 2)。これによって、従来と比べて吸収効率を 10%以上改善することに成功した。また、この際に得られたボロメータ素子間の電磁的なクロストークは 1%を切る優れたものであった。この成果を投稿論文として準備中である。

さらに、TES ボロメータを数 100kHz の高周波電圧でバイアスする周波数分割方式では、配線間の電氣的なクロストークを極力抑える必要がある。そこで、有限要素法を用いた磁場シミュレーションによって往復の配線間距離を  $10\ \mu\text{m}$ 、配線ペア同士の距離を  $120\ \mu\text{m}$  に決定し、0.5%以下のクロストークを実現した。これらの計算を基にして複数画素の TES ボロメータアレイの総合的な設計を行った。

TES ボロメータの 55 画素アレイのテスト品(図 3)を SQUID とつなぎ合わせて、TES ボロメータの特性を評価し、信号の安定な読み出しを実現するに至った。次に、SQUID 読み出し回路の詳細な周波数特性の評価を行った上で、TES ボロメータの各画素をそれぞれ異なる周波数の交流電流で駆動して変調・復調を行う周波数分割読み出し方式ができるものであることを確認した。最終的に、この SQUID 読み出し系と 55 画素を持つ TES ボロメータアレイのテストウェハーを組み合わせ、1 つの SQUID 素子で 8 画素を読み出す周波数分割式のマルチプレクス読み出しを実現した。

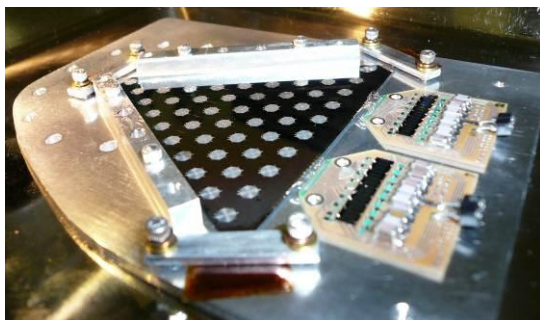


図 3 TES ボロメータアレイのテストウェハーとそのセットアップ。シリコンウェハー上の個々の円形の構造が個々のボロメータ素子である。

## 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 2 件)

- ① Tai Oshima, and Hiroshi Yoshitake, "Optimization Method for TES Microcalorimeters with Absorbers", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19, 465-468 (2009) 査読有り
- ② T. Oshima, Y. Yamakawa, H. Kurabayashi, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Mitsuda, K. Tanaka, "A High Energy Resolution Gamma-Ray TES Microcalorimeter with Fast Response Time", Journal of Low Temperature Physics, 151, 430-435 (2008) 査読有り

[学会発表] (計 4 件)

- ① 大島 泰, "サブミリ波天文学のための TES 開発", 超伝導カメラと関連技術研究会, 2009 年 2 月 20 日, 筑波
- ② T. Oshima, "Optimization Method for TES Microcalorimeters with Absorbers", IEEE Applied Superconductivity, 2008 年 7 月 18 日, 米国・シカゴ
- ③ 大島 泰, "ASTE によるサブミリ波銀河探査のための 3 色 TES ボロメータカメラの開発", 日本天文学会, 2008 年 3 月 24 日, 東京都渋谷区
- ④ T. Oshima, "A high energy resolution gamma-ray TES microcalorimeter with fast response time", 12th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2007 年 7 月 24 日, フランス・パリ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大島 泰 (OSHIMA TAI)

国立天文台・野辺山宇宙電波観測所・助教  
研究者番号: 40450184

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし