

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01260

研究課題名(和文) 銀河間プラズマの集中と循環を探るX線カロリメータ大型アレイの開発

研究課題名(英文) Development of Large X-ray microcalorimeter array to study concentration and circulation of intergalactic medium

研究代表者

山崎 典子 (Yamasaki, Noriko)

国立研究開発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：20254146

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：X線のエネルギーを精度よく測定し、同時に位置検出を行なう撮像分光素子として、将来の宇宙X線観測に重要な役割を果たすと考えられる、超伝導遷移端(TES)マイクロカロリメータのGHz帯を利用した信号多重化読み出し手法の開発を行なった。実際に40画素について、TESアレイと共振回路を結合させた100mKでのX線照射実験を行ない、エネルギー分解能として3eV以下を得ることができた。これは世界最高レベルの結果である。この手法により既存のマイクロ波アンプ等と組み合わせることで、250画素の多重化を可能とすることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河、銀河間での希薄な高温プラズマの直接観測を行なうことは、宇宙の化学的、力学的な進化を探る上では非常に重要な手法と考えられる。本研究による開発は、そのためのキー技術であるマイクロカロリメータの信号多重化の実現可能性を世界に先駆けて十分に示した。これにより、大視野高エネルギー分解能でのX線サーベイ観測の可能性が示された。またこのような技術は、天文学のみならず、蛍光X線を用いた物質の微量分析などへの応用も期待される。

研究成果の概要(英文)：We have developed a signal multiplexing readout technique using GHz band for a superconducting transition edge (TES) microcalorimeter array, which is expected to play an important role in the future X-ray observation as an imaging spectrometer to measure the X-ray energy precisely and to detect the position at the same time. We performed a combined test of this multiplexer and a TES array under cryostat environment, and obtained simultaneous readout of 38 pixels with the energy resolution better than 3 eV. This is the highest level result in the world. We have shown that this method can be expanded to multiplex 250 pixels in combination with existing microwave amplifiers.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：銀河間物質 X線天文学 極低温検出器 超伝導遷移端検出器 超伝導回路

1. 研究開始当初の背景

マイクロカロリメータは、100 mK 程度の極低温で放射線入射による微小なエネルギー入力を熱として測定することで、粒子検出器として用いると優れたエネルギー分解能を発揮する。特に超伝導転移を用いた TES(Transition Edge Sensor)は、 γ 線から可視光まで広い範囲で photon counting を可能とし、特に X 線領域(1-10 keV 程度)では、原理的なエネルギー分解能が 2eV 程度になることが知られており、天文観測、物質分析等幅広い応用が期待される。天文観測に用いる場合、複数画素でアレイ化し、撮像と分光を両立させることができることが回折格子による分散分光との大きな違いである。アレイを実用化するためには極低温化にセンサを置くことが必要のため、配線による熱入力が問題となり、複数画素の信号を多重化して読み出すことが望ましい。信号多重化を行なわない例としては、2022 年に打ちあげ予定の XRISM 衛星では、TES ではない Si 温度計によるカロリメータ 32 画素を並列に読みだし、エネルギー分解能 5eV を目標としている。これを越える画素数を実装するために、TES を想定してこれまで開発されてきた手法として、MHz 領域で AC 電流によりバイアスし、信号をアナログ的に加算して室温で復調する Frequency Domain Multiplexing (FDM)、微小電流を読み出す SQUID を低温領域でスイッチとして用い、信号を切り替えて多重化する Time Domain Multiplexing (TDM)などが用いられ、数 10 画素の多重化が行われてきた。TES の信号の本質的なスピードはセンサ内部の熱拡散で決り、X 線用センサでは μsec オーダーである。そのため MHz 領域での多重化では \sim 100 画素が限界であると考えられている。実際 2030 年代打ちあげ予定の Athena 衛星では、40 画素を多重化、96 組の信号系による 3840 画素の TES アレイの利用が計画されている。より多数の信号を多重化するために、GHz 帯域での信号多重化が原理的に有効である。Rf-SQUID と GHz 共振器を組み合わせた Microwave Multiplexer (MW-MUX)が 2008 年に Matesらによって提案された。日本では産業技術総合研究所の神代、平山らが、超伝導回路技術を生かして MW-MUX の作製を始め、2013 年により信号の遅い γ 線用 TES の多重化を行なった。X 線センサに MW-MUX を応用するには、より早い信号に対応するため、読み出しシステム全体の高速化、特に共振器の帯域幅を 3MHz 以上にすることが求められる。我々は、本科研費に先立って、X 線領域で利用できる MW-MUX の要求を検討し、初期実験において 2 画素の多重化に成功し 2017 年に X 線領域での世界で 2 例目の適用として発表したが、エネルギー分解能等まだまだ不十分であった。

2. 研究の目的

宇宙の進化を理解する上では、宇宙論モデルに基づいた構造形成と、星や銀河の形成などの天体現象の双方、そして相互作用の理解が重要である。銀河間物質のゆらぎを種にした重力収縮から銀河が形成され、一度冷えた星間物質を経て星形成される。

HSC などによる最近の遠方($z > 4$)銀河の観測により、星形成率は銀河サイズや銀河への銀河間空間からの質量降着率によって制御されていると考えられる。一方残った銀河間物質は、ポテンシャルエネルギーを得て次第に高温になる。1000 万度以上の銀河団に伴う高温プラズマは X 線あるいは重力レンズ等でよく観測されているが、実際には中間温度領域である 100 万度以上の中高温銀河間物質 (WHIM)が、バリオンの大多数を占めていると推定されている。銀河団ガスには、銀河の 1/3 程度の重元素が見られるため、急激な星形成は超新星爆発の連鎖を産み、重元素を含む高温プラズマが重力ポテンシャルを再び越えて、「銀河風」として銀河間空間にフィードバックすると考えられている。

このように電離した星間物質の銀河からにおける性質、あるいは銀河間空間への脱出の実態、また WHIM の直接観測のためには、非常に希薄な高温プラズマの定量的観測が必須である。そのためには TES マイクロカロリメータなどによる大視野酸素輝線マッピングが有効な手法であることは、研究代表者らが 2000 年代初期に指摘し、他の計画提案なども追従してきた。Athena 衛星の視野は 3 分角に過ぎないが、これを越える次世代のマイクロカロリメータアレイによる広視野サーベイを実現させるキー技術として、MW-MUX による X 線用 TES の信号多重化手法の開発を行なう。

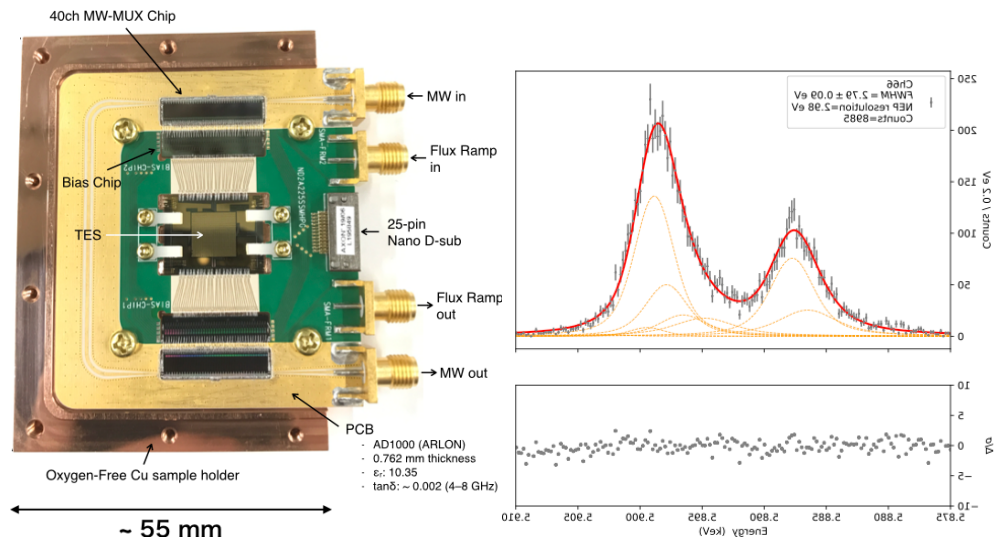
3. 研究の方法

本研究では、TES カロリメータアレイそのものの開発は、これまでのリソースを使うことにし、あまり行なわず、極低温 GHz 共振器と室温復調回路の製作、組み合わせ試験による問題の把握とフィードバックに注力する。共振回路全体で利用する帯域としては、市販の低雑音アンプを利用することを想定し、4-8 GHz 程度と設定する。1/4 波長共振回路を帯域内に複数設置し、それらが TES と結合した rf-SQUID により終端されている。TES に信号が入り、電流が流れると rf-SQUID のインダクタンスが変わることで共振周波数が変化するため、それを共振特性の変化として検波する。共振の最初にシミュレーションにより、共振回路に要求される性能である帯域幅、結合定数などを決定する。実際の回路作製には、産総研の CRAVITY を用いることとして、rf-SQUID を含む超伝導回路の設計、製作を行なう。SQUID の出力を線形化するため、rf-SQUID にはモジュレーションコイルから変調磁束として Ramp 波が印加される。Ramp 波の一周期ごとに位相を決定するため、この Ramp 波の掃引速度が信号のサンプリング速度となる。カロリメータの信号は、最適フィルタ処理といわれる信号波形全体をもちいた信号処理により、

ノイズの寄与を減らし、高エネルギー分解能を実現する。そのためこのサンプリング速度も性能を左右する重要なパラメータである。使用する TES カロリメータを想定して、サンプリング速度を決定し、それを実現するための室温の Ramp 波作製および波形取得回路を設計、製作する。製作した回路系は、研究協力者であるオランダ SRON による TES アレイと結合して、低温化での試験を行なう。そのために GHz 信号線を冷却器内に導入し、必要な高周波回路の設計、配置を行なう。

4. 研究成果

数度に渡って共振回路の改良・製作を行ない、TES 素子との結合試験を行なった。各共振周波数での帯域を 2 MHz, チャンネル間の周波数間隔を 16 MHz と設定し、4.65-5.28 GHz, 5.29-5.92 GHz にそれぞれ 40 チャンネルの共振器を作製した。それぞれの共振器サイズは $5 \times 20 \text{ mm}^2$ である。そのうちの 40 チャンネル分を TES アレイと接続し、冷却試験を行ない、38 画素からのデータ取得に成功した。室温回路の Ramp 周波数は 500 kHz である。不良の 2 画素は TES の不良によるものと考えている。もし 4-8 GHz 全体を用いれば、250 程度の TES 素子が 1 系統の読み出し回路で読めることとなる。の図に極低温ステージのセットアップと得られたうちの最良エネルギー分解能のエネルギースペクトルを示す。TES との結合インダクタンスを大きくすることにより、SQUID の雑音を相対的に減らすことに成功し、読み出し雑音は $10 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度であり、得られたエネルギー分解能は、最良のもので 2.8 eV (FWHM at at 5.9 keV) であり、平均では 3.3 eV 程度であった。38 画素の X 線 TES マイクロカロリメータを MW-MUX の手法で読み出したのは世界発であり、また実験室内ではあるが、XRISM 衛星の 32 画素、 5 eV のエネルギー分解能を上回ったことで、今後の実用化への大きな進展を見せたといえることができる。これらの結果は、Applied Physics Letters に発表済みである。



図：(左) 実際の測定系セットアップ，4 本の高周波同軸線を用いている。(右) ^{55}Fe による Mn Ka1、Ka2 線付近のエネルギースペクトル。知られているエネルギー準位の 6 本の輝線を自然幅も含めてモデル化し、エネルギー分解能 2.8 eV を求めている。Ka1、Ka2 のうち最も強い輝線のエネルギー差は 11 eV 程度であるが、明確に分離されている。

<引用文献>

Nakashima et al. “Low-noise microwave SQUID multiplexed readout of 38 x-ray transition-sensor microcalorimeters”, Applied Physics Letters, 177, 122601(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 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Nakashima, F. Hirayama, S. Kohjiro, H. Yamamori, S. Nakasawa, A. Sato, N. Y. Yamasaki, and K. Mitsuda	4. 巻 29
2. 論文標題 Investigation of Large Coupling between TES X-Ray Microcalorimeter and Microwave Multiplexer Based on Microstrip SQUID	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transaction on Applied Superconductivity	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） 10.1109/TASC.2019.290568	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 Nakashima Y., Hirayama F., Kohjiro S., Yamamori H., Nagasawa S., Sato A., Irimatsugawa T., Muramatsu H., Hayashi T., Yamasaki N. Y., Mitsuda K.	4. 巻 193
2. 論文標題 Readout of X-ray Pulses from a Single-pixel TES Microcalorimeter with Microwave Multiplexer Based on SQUIDs Directly Coupled to Resonators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 618 ~ 625
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-018-2030-0	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 -
1. 著者名 Nakashima Y., Hirayama F., Kohjiro S., Yamamori H., Nagasawa S., Sato A., Irimatsugawa T., Muramatsu H., Hayashi T., Yamasaki N. Y., Mitsuda K.	4. 巻 193
2. 論文標題 Readout of X-ray Pulses from a Single-pixel TES Microcalorimeter with Microwave Multiplexer Based on SQUIDs Directly Coupled to Resonators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 618 ~ 625
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-018-2030-0	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 S. Yamada, T. Ohashi, Y. Ishisaki, et al.	4. 巻 193
2. 論文標題 Super DIOS: Future X-ray Spectroscopic Mission to Search for Dark Baryons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1016 ~ 1023
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-018-1918-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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 中島 裕貴、平山 文紀、神代 暁、山森 弘毅、永沢 秀一、佐藤 昭、山崎典子、満田和久
2. 発表標題 Investigation of Large Coupling between TES X-ray Microcalorimeter and Microwave Multiplexer Based on Microstrip SQUID
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (ASC) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 検出器との結合強化によるマイクロ波多重読出回路の低雑音化
2. 発表標題 検出器との結合強化によるマイクロ波多重読出回路の低雑音化 中島 裕貴, 神代 暁, 平山 文紀, 山森 弘毅, 永沢 秀一, 山崎典子, 満
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高速応答マイクロ波SQUIDによるTES型X線カロリメータの読出と読出雑音
2. 発表標題 中島 裕貴、平山 文紀、神代 暁、山森 弘毅、永沢 秀一、佐藤 昭、入松川 知也、村松はるか、林佑、山崎典子、満田和久
3. 学会等名 超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Nakashima, Fuminori Hirayama, Satoshi Kohjiro, Hirotake Yamamori, Shuichi Nagasawa, Akira Sato, Shinya Yamada, Ryota Hayakawa, Noriko N. Yamasaki, Kazuhisa Mitsuda, Kenichiro Nagayoshi, Hiroki Akamatsu, Luciano Gottardi, Emanuele Taralli, Marcel P. Bruijn, Marcel L. Ridder, Jian-Rong Gao, and Jan Willem den Herder
2. 発表標題 Development of microwave multiplexer for the Super DIOS mission: 38 transition-edge sensor x-ray microcalorimeter readout with microwave multiplexing
3. 学会等名 SPIE Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray (11444) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kosuke Sato, Takaya Ohashi, Yoshitaka Ishisaki, et al.
2. 発表標題 Super DIOS mission for exploring "dark baryon"
3. 学会等名 SPIE Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray (11444) (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究分担者	平山 文紀 (Hirayama Fuminori) (10357866)	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	山田 真也 (Yamada Shinya) (40612073)	立教大学・理学部・准教授 (32686)	
研究分担者	大橋 隆哉 (Ohashi Takaya) (70183027)	東京都立大学・理学研究科・客員教授 (22604)	

	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	中島 裕貴 (Nakashima Yuki)		

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			
オランダ	SRON			