

論文の内容の要旨

Development of a Microwave SQUID Multiplexer for a TES X-ray Microcalorimeter Array for Future Astrophysical Observations

(将来の宇宙観測を目指したTES型X線マイクロカロリメータアレイ
読み出しのためのマイクロ波SQUIDマルチプレクサの開発)

氏名 中島 裕貴

1. 研究の背景と目的

宇宙に大きく広がるプラズマからの放射を捉え、その物理状態を直接的に診断するX線撮像分光は、観測手段の進歩、感度・精度の向上につれ様々な宇宙の階層構造姿を明らかにしてきた。しかし、例えばX線背景放射の完全な理解がまだされたわけではなく、近傍宇宙でのミッシングバリオンからの放射や宇宙初期の大質量ブラックホールからの放射の可能性が示唆されつつも、その直接観測には至っていない。超伝導転移端(TES)型X線マイクロカロリメータは広視野・高角度分解能・高分光性能を併せ持つ将来のX線撮像分光器として最も有望である。TESは100 mK以下の低温下で動作させることが必要であるが、原理的には6 keVで2 eV以下の分解能となりえ、CCD検出器のそれを2桁近く上回る。また、アレイ化することで撮像性能を有することができる。一方で、100 mK以下という動作環境を保つためには室温からの熱流入を抑える必要があり、多画素化には読み出し配線数の減少のために信号多重化読み出し技術が必要である。2031年に打ち上げが予定されているAthena衛星のX-IFUでは、FDM(周波数分割方式)による多重化により、3840画素を40画素x96系統で読み出し、分光性能2.5 eVを目標としている。AthenaでもCCDの100万画素には遠く及んでおらず、Athena以降の更なる画素数増大の要求に対応するためには新たな多重化技術が必要となる。多重化技術には、低雑音・低発熱・広帯域が求められる。特にX線マイクロカロリメータは、シングルフォトンカウンティングであり、信号の立ち上がりが小さな熱容量をもつ素子中での熱拡散で決るため、数10 μ sec程度以下であり、信号帯域は数10-100 kHzに相当する。FDMはMHz帯を用いるため1系統の多重化数の原理的限界値は数10画素である。マイクロ波

SQUIDマルチプレクサ(MWMUX)は帯域幅を数GHzに拡張した信号多重化技術である。1本のマイクロ波フィードラインに1/4波長共振器を画素数分ぶら下げ、各共振器は高感度な磁束計である超伝導量子干渉計(SQUID)で終端する。SQUIDにTESカロリメータの抵抗変化による信号を、電流・磁束の変化として入力すると、SQUIDが磁束に対する可変インダクタとして機能し、共振周波数が変化する。それを単色トーンの透過パワーとして測定する。共振周波数の異なる共振器を並列に置くことで、複数のTESカロリメータの信号を多重化することが可能となる。また、FDMで使用するDC-SQUIDと異なり、直流電力消費がないRF-SQUIDを用いることで低発熱である。

MWMUXの研究はX線TESに比べて熱容量が大きく信号帯域が狭いガンマ線TES読み出し用として最初に開発が進められ、これまでに128画素の同時読み出しが米国標準技術研究所(NIST)により行われた。一方で、宇宙応用を考えたX線TESではGSFC/NASAが28画素の同時読み出しで中央値3.4 eV@5.9 keVの分光性能を報告しているが、画素数・性能の向上余地のみならず開発課題も多く残されている。

本論文では、将来の宇宙観測応用に向けた日本発技術の創出を目指し、日本で初めてX線TES読み出しに特化したMWMUXの開発を行い、MWMUXの広帯域化、低雑音化、画素数増大化を図った。原理実証として、5x20 mm²のチップ上に40画素用の共振器を作成し、この回路をX線TESアレイと接続し、40画素の同時読み出しを試み、38画素からの信号を得てその性能を評価した。

2. X線TESカロリメータ読み出しMWMUXの開発

従来開発されてきたガンマ線と比較して広帯域なX線TESカロリメータを読み出すために共振帯域幅(BW)を広げたMWMUXを新たに開発した。X線TESの信号の立ち上がりを10 μsec程度と想定し、そこで複数回のサンプリングを行なうために、最低でも500 kHzの変調磁束用Ramp波に対応できる共振器として、2 MHzのBWを要求とし、共振のスペーシングはその8倍、16 MHz程度とした。読出回路の帯域幅と雑音を制約する多重化

チップ後段の極低温化合物半導体増幅器に、高電子移動度化合物半導体トランジスタ(HEMT)を用いる4-8 GHz帯域の市販品を想定すると、1系統で

240画素の多重化が可能となる。

BWを広げるために、フィードラインと共振器間のカップリングキャパシタの容量増大等、新たな設計指針を定めた上、5x20 mm²のチップ内に40個の共振器及びSQUIDを並べ

ることができた。今回は帯域の異なる2チップ上に80ch分の共振器を構成し

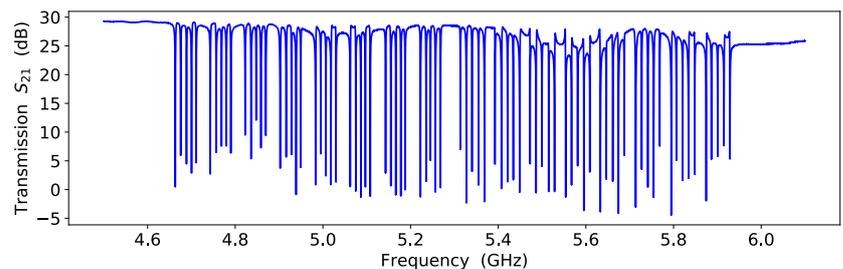
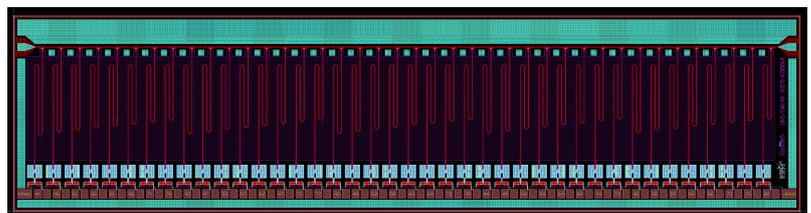


図1. (上) 40ch MWMUXチップ上レイアウトと (下) MWMUXチップを2個縦列接続して得られた80個の共振

た。TESとの結合度(相互インダクタンス)を増大したSQUIDを新たに開発し、読み出し雑音は $10 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度とDC-SQUIDに迫る性能を実現した。また、チップ上フィードラインでのマイクロ波反射の抑制のための工夫を新たに施し、全読出帯域に渡ってその効果を実証した。

3. MWMUXを用いた38画素TESの同時読み出し

開発した40chのMWMUXを使用してX線TESの信号多重化—同時読み出しによる評価試験を行なった。X線TESはTi/Auの二層薄膜を主材料とする 32×32 二次元アレイ構成で、SRONがX-IFUのバックアップとして開発している素子を使用した。MWMUXとの間に40画素の信号配線を接続をしたが、2画素についてはTESの動作不良のため、38画素から ^{55}Fe 線源の照射によるX線信号を同時に検出した。TESは超伝導薄膜ゆえに残留磁場等により感度が劣化し、波高値が小さくなることがある。そのため極低温ステージに超伝導コイルを搭載し、残留磁場の打消し用磁場を印加できるようにした。実際の測定では、 ^{55}Fe X線源起因磁場を打ち消したと考えられる印加磁場の最適化はTESのIV特性からTESの消費電力が最大となるように決定したが、コイルの印加磁場、残留磁場の位置依存性から全画素の磁場最適化はできていない。TESの動作点は、代表的な1画素での雑音等価電力(NEP)と、その動作点での波高値からNEPのみで決る原理的分解能を評価し、転移端上の動作点の抵抗値が常伝導抵抗の約20%になるよう設定した。以上の条件でパルスを蓄積しエネルギー分解能を評価した。

TESカロリメータは単なるピーク波高値の評価ではなく、仮想的テンプレート波形と取得波形の比を波高値(PHA)として求める最適フィルタ処理を施すことで、分解能を向上させることができる。本実験では周波数空間でのフィルタとして、DC成分を落とし、画素ごとの波形に応じて高周波成分をカットした。また有限のサンプリングによるArrival-time effectの影響を低減するために、PHAの作成時にトリガー時間のラグの可能性を考慮した。また、極低温ステージの温度等に影響されるTESのゲイン変動によるエネルギー分解能への影響を補正するために、無信号時のベースラインとPHAの相関関係を用いてPHAを補正した。

以上の処理を施して最終的に得られたエネルギー分解能(FWHM)は、 5.9 keV のMn $K\alpha$ のX線に対して、最良値で $2.79 \pm 0.09 \text{ eV}$ 、38画素の中央値で 3.3 eV であった。また、全画素の合算スペクトルの分解能は $3.40 \pm 0.02 \text{ eV}$ であった。実験に用いたTESは他の読み出し手法で評価されていないため、今回開発したMWMUXによる分解能の劣化を直接的に評価することは難しい。そのため、臨界温度以上に昇温しTESを常伝導状態にした時の雑音スペクトルを（MWMUXの読み出し雑音+ $100 \text{ m}\Omega$ の熱雑音）と仮定して読み出し雑音のエネルギー分解能への寄与を計算し、 $1.0\text{--}1.8 \text{ eV}$ 程度の寄与と推定した。

4. 考察と今後の展望

開発したMWMUXを使用し、1系統による38画素X線TESの同時読み出しで、エネルギー分解能を評価し、 5.9 keV のX線に対するFWHMとして最良値 $2.79 \pm 0.09 \text{ eV}$ 、38画素の中央値 3.3 eV の性能を確認した。これは、2016年に軌道上で動作したHitomi衛星の32画素 4.5 eV の性能を画素数、分解能の両面で凌駕している。さらに、2031年に打ち上げが予定されている次世代X線天文衛星AthenaのFDM方

式による1系統40画素で2.5 eVの要求値にも匹敵する結果である。将来の衛星搭載を目指しエネルギー分解能と画素数に関して、今後考慮すべき点と拡張性について考察する。

1. エネルギー分解能

今回測定したSRON製TESの素子固有の分解能は未評価であるが、MWMUXの読出し雑音の分解能への寄与は上限値1.8 eVであり、読出し雑音を実験的に得られた系の分解能に大きく寄与しているとは考えにくい。一方で、分解能の制限や画素間不均一性に寄与するであろう要因としては、TES上の環境磁場が画素間で一様に打ち消せていないであろうこと、TES上の熱的あるいは共振器間の電気的カップリングによる画素間クロストーク、極低温ステージ上の温度勾配や測定中の温度安定度によるゲインの変動、画素数と共に増大するマイクロ波電力による低温HEMTアンプや室温処理回路の電力飽和等が考えられる。今後はこれらの分解能バジェットを明らかにし、磁場・温度の制御等の測定環境も含めた読み出し系の最適化を図る必要がある。

2. 画素数

今回の測定では帯域を制限している汎用HEMTアンプ帯域（4 GHz）の2割弱を用いてAthenaのFDMに匹敵する画素数を良い分解能で読み出すことに成功した。4 GHzの全帯域を活用した場合には、1系統で240画素の読み出しが可能となる。さらに8 GHz以上の帯域幅を有する市販HEMT増幅器の活用やHEMTアンプの並列化が可能となれば画素数は桁で大きくなる。また、GSFC/NASAのLynx衛星で計画されている1つのTESに熱リンクの強さが異なる複数の吸収体を結合させるTES多画素化の研究も25画素の多重化で良い結果を出しており、これとMWMUXを組み合わせることで1系統で1000-10000画素の多重読み出しが可能となる。

以上に見るようにMWMUXによるX線TESカロリメータの多重読み出しは大変有望であり、将来の宇宙物理学において必須となる読み出し技術である。本論文では、その先駆けとして1系統の同時読み出しにより38画素、エネルギー分解能3.3 eVでの読み出しを実証した。

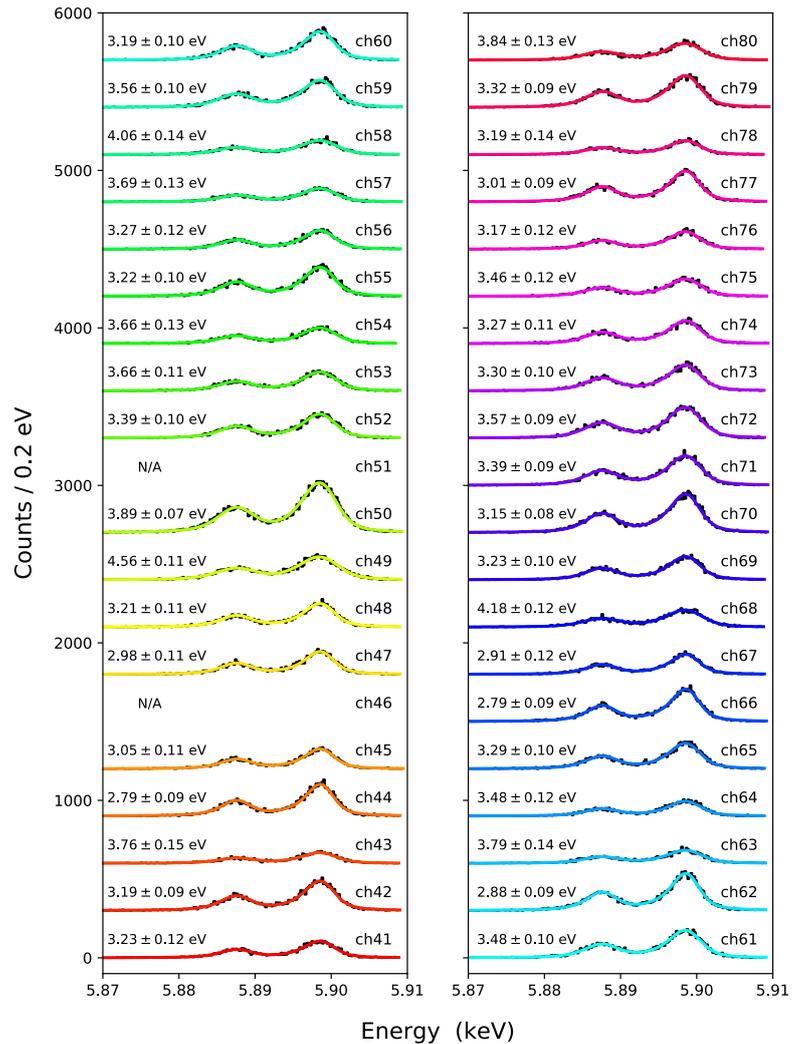


図2. MWMUXを用いて同時取得したTESカロリメータ38画素のエネルギースペクトル。