

論文審査の結果の要旨

氏名 中島裕貴

本論文は10章からなる。第1章ではイントロダクションとして、本研究の主題である超伝導転移端(TES)型 X線マイクロカロリメータアレイから信号を読み出すためのマイクロ波 SQUID マルチプレクサ(MWMUX)の開発に至った研究背景と共に、本論文の定めた MWMUX の開発目標が示されている。第2章ではレビューとして、将来の X線天文学のサイエンスターゲットとそれから導かれる MWMUX の開発目標について説明し、TES および MWMUX 以外のマルチプレクサの概要を述べている。最後に MWMUX の基本構成と先行研究が紹介されている。第3章では、MWMUX の基本動作原理の説明がなされている。第4章から第6章にかけては、MWMUX の開発過程が段階的に述べられている。第7章では MWMUX に 40ch 超伝導転移端(TES)型 X線マイクロカロリメータを組み合わせた実証実験装置の説明がなされ、第8章に実験結果がまとめられている。第9章では議論として、エネルギー分解能に関する結果の解釈と今後の可能性について述べた後、画素数向上に関する今後の可能性について述べられている。第10章では、本論文全体の結論がまとめられている。

X線天文学の分野では Soft X-ray Diffuse Background (SXDB)の存在が認められ、研究の対象となってきたが、全貌が解明されるには至っていない。そして近年、遠方宇宙での Super-Massive Black Hole や近傍宇宙にある Warm Hot Intergalactic Medium (WHIM)などが SXDB の構成要素として示唆されている。そのような背景のもと、WHIM から放出される酸素起因の特性 X線を精密に測定することを目的として、X線衛星計画 Super Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (sDIOS)が国内の将来計画として立案されている。そして、sDIOS の目的達成のためには、広視野・高角度分解能・高分光性能を併せ持つ X線撮像分光器の実現が必須である。

TES 型 X線マイクロカロリメータは将来最も有望な X線撮像分光器である。その一方で、TES は 100 mK 以下の低温下で動作させるため、室温からの熱流入を制限する必要がある。従って、多画素化のためには、読み出し配線数低減のために、信号多重化読み出し技術が必須である。その読み出し技術には低雑音・低発熱・広帯域が求められるが、論文提出者により、直流電力消費が無く低発熱の RF-SQUID を用いると共に、マイクロ波によって帯域幅を GHz に引き上げた新しい MWMUX の開発が段階的に進められた。最初に「基礎設計用」が制作され、その後に「低雑音化実証用」が続き、最後に「多画素読み出し実証用」が開発された。そして、「多画素読み出し実証用」の MWMUX に TES を接続し、38 画素の同時読み出しに成功した。

本論文で開発された MWMUX では、6 本の信号線のみで最大 40 ch の信号読み出しを可能にし、各 ch のバンド幅 2 MHz 以上を実現した。2 MHz 以上のバンド幅は、信号の立ち上がり時間が 10 μ sec 程度の X 線観測に必要とされている。そして、TES 自身の雑音よりも十分小さい 10 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の Readout noise が達成された。TES を接続して行われた実証実験では、38 画素で 5.9 keV の X 線の同時読み出しに成功し、エネルギー分解能の最良値として 2.79 ± 0.09 eV、38 画素の中央値 3.3 eV の性能を確認した。エネルギー分解能に対する MWMUX の寄与は、1.0-1.8 eV 程度と推定された。

本論文で達成された同時読み出し画素数、エネルギー分解能、Readout noise は、全てにおいて論文提出時点で世界最高の数値である。また、2031 年に打ち上げ予定の Athena で要求されている 40 画素、エネルギー分解能 2.5 eV に匹敵する値であることも特筆に値する。本論文では、Readout noise をさらに低減する方法と共に、画素数を増やしていく方法についても言及されており、今後の発展が期待できる。以上より、本論文の結果は、博士論文として十分な価値を持つと判断する。

本論文で開発された MWMUX のパラメータ設計およびマスクレイアウトの設計・制作は、論文提出者により全て行なわれた。特に、論文提出者独自の発想により、同一構造の SQUID に対して、回路上にある接地点の位置を変えるだけで、異なるインダクタンスを持つ SQUID の製作が可能になった。これは、多画素化を容易にする重要なアイデアである。また実験に関しても、論文提出者が主体となって、準備から解析まで行ったものである。以上より、論文提出者の主体性と寄与は博士論文として認めるのに十分であると判断する。

したがって、本論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。