

論文審査の結果の要旨

氏名 酒井和広

本論文は7章からなる。第1章はイントロダクションであり、本研究の目的として、将来の宇宙ミッション、特に2020年代に計画されているX線天文衛星DIOSやATHENAに搭載される数百・数千という規模の高エネルギー分解能検出器アレイの実現を目指すことが記述されている。

第2章では、高エネルギー分解能X線検出器アレイの具体的な提案が示されている。金属の超伝導遷移端を温度計として用いた超伝導遷移端(TES)型X線マイクロカロリメータは、優れた分光性能と高い空間分解能を両立できる。半導体温度計を用いたマイクロカロリメータの場合、そのエネルギー分解能は高いものの、半導体素子の入力容量と高い入力インピーダンスにより信号多重化に向かず、高い空間分解能の達成が難しい。100 mKといった極低温で用いられる検出器では、熱流入を抑えるため配線本数の削減が必須であり、信号多重化は不可欠である。その点、TESを用いたマイクロカロリメータはその低い入力インピーダンスにより多重化に向いている。また、その理論的なエネルギー分解能は5.9 keVのX線に対し半値全幅(FWHM)で2 eV以下と高い。以上の理由により、TES型X線マイクロカロリメータが最も有望な検出器であることがこの章で解説されている。

第3章では、低発熱型SQUIDの開発について記述されている。これは提案された検出器システムの鍵となるもので、SQUIDに要求される100 V/A以上のゲインや4 Kにおいて10 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の入力換算電流ノイズといった性能値を満たしつつ、発熱を20 nWまで抑えた低発熱型SQUIDの開発に成功したため、シングルステージ構成による信号読み出しが可能という非常に大きな利点を生み出した。続く第4章では、デジタル回路による周波数分割信号多重化装置の開発について記述されている。X線入射によるTES信号帯域は100 kHz程度と大きく、多重化に必要な帯域は数 MHz から十数 MHz となり、通常のSQUID駆動装置は使用できない。この研究では、市販されている高速FPGAと高速ADC/D ACモジュールボードを組み合わせ、デジタル回路による信号多重化装置を開発した。その帯域は10 MHz以上あり、DIOS/ATHENA双方で要求されるS/N比を保ったまま少なくとも16素子までの多重化が可能である。この低発熱型SQUIDと周辺エレクトロニクスの開発が、本論文における重要な研究成果であり、高性能X線マイクロカロリメータ実現への貢献が大きい。

第5章では、X線源を用いた TES 4 素子多重読み出し試験の結果が解説されている。この試験で用いられた TES は Ti/Au 二層薄膜の 64 素子アレイで、吸収体は Au である。SQUID と LC フィルタはインダクタ付き 4 入力低発熱型 SQUID 基板を用いている。X線源としては ^{55}Fe 線源を、また冷凍機は無冷媒希釈冷凍機を用いた。本試験において FDM による TES 4 素子の信号多重同時読み出しに成功し、そのエネルギー分解能として 5.9 keV に対し 20 eV FWHM が実現した。このシステムにおける TES を除く周辺エレクトロニクスのエネルギー分解能への寄与はその内の 2 eV 程度であり、DIOS の要求値に対しては目途が立ったことになる。

第6章では、信号読み出しシステムの雑音が最終的なエネルギー分解能にどのように影響するかについて考察されている。また、原因が明確にわからない過剰雑音やチャンネル間の混線についても解説されており、これらについては引き続き、研究が進められている。

最終の第7章では、本研究のまとめと将来の展望が示されている。これからますます精密さを増してゆく X 線天文学に必要とされる高エネルギー分解能検出器の可能性が本研究により飛躍的に高まったと評価でき、宇宙物理学に貢献したと認められる。なお、本論文は竹井洋、山本亮、山崎典子、満田和久、日高睦夫、永沢秀一、神代暁、宮崎利行との共同研究であるが、論文提出者が主体となって開発及び解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。