

概要

X線天文学では、従来のX線CCDのエネルギー分解能($\Delta E \sim 120$ eV)を大きく上回る半導体マイクロカロリメータ($\Delta E \sim 5$ eV)の登場により、精密分光という新たな切り口から宇宙の進化の解明が期待されている。一方で、観測精度の向上に伴い、観測スペクトルの解析に用いられるプラズマ輝線モデルの不定性が新たな課題として顕在化している。宇宙科学研究所では、プラズマ輝線モデルの実験的検証を目的として、電子ビームイオントラップ(EBIT)を運用している。EBITはX線天体と等価なプラズマを実験室内で再現できる装置であり、生成したプラズマの輝線放射を分光測定することで、モデル計算に必要な原子データの実験的検証が可能である。しかし、現行の宇宙研EBIT(以下、JAXA-EBIT)では、肝心のX線分光器として半導体検出器($\Delta E \sim 130$ eV)が用いられており、輝線の精密分光を行うには分光性能向上が必要である。そこで、次世代のX線検出器であるTES型X線マイクロカロリメータの高い分光性能($\Delta E \leq 3$ eV)に着目し、JAXA-EBITへの実装を目指している。本修士論文では、JAXA-EBITへのTES実装における課題の確認と、TESアレイの製作・評価を行った。

まずEBITの強磁場環境(中心磁場 ~ 0.8 T)がTESのエネルギー分解能に与える影響を定量的に評価するため、TESの温度感度の磁場依存性を実測により調べた。測定の結果、10 uT程度の外部磁場であってもTESの温度感度が約70%減衰し、理論的に達成可能なエネルギー分解能は約1.8倍に劣化することを確認した。したがって、EBIT搭載に向けては磁気遮蔽が必須であることが明らかとなった。そこで有限要素法を用いた磁気シールドのシミュレーションを行い、検出器をEBITに近づけられる距離の限界値を見積もった。その結果、磁気遮蔽による要求から検出器とEBITとの距離を40 cm程度離す必要があり、それに伴いカウントレートが大幅に低下することが示された。想定されるカウントレートを基に検討を行った結果、単ピクセルのTESでは十分な計数率が得られず、最低でも数十ピクセルのアレイ化が必要であることが分かった。

続いて、有効面積の拡大を目的とした224画素TESマイクロカロリメータアレイの製作に取り組んだ。歩留の高い素子製作に主眼を置き、最も歩留を制限していた配線形成プロセスの見直しを行った。中心64画素に取り付けた配線のうち、従来のプロセスでは歩留が平均30%程度であったが、本修論で最適化したレジストパターンニング条件により歩留90%以上を達成した。

さらに、製作したTESアレイの動作実証および性能評価として、KEK/QUPの希釈冷凍機とマイクロ波SQUIDマルチプレクサを用いた信号の多重読み出し実験を行った。読み出しを行った32チャンネルのうち、26チャンネルで超伝導転移を確認し、そのうち24チャンネルにおいてX線信号の取得に成功した。本実験により、EBIT実験に向けた検出器および読み出し系の基本的な実証が達成された。一方で、アレイ中の素子性能にはばらつきが見られ、均一な素子性能を実現するための製作条件の最適化が今後の課題である。また、配線の多層化や読み出しチャンネル数の拡張、およびJAXA-EBITへの実装に向けた実験環境の整備を進めることで、TES搭載EBITを用いたプラズマ精密分光の実現を目指す。