

概要

X線分光学一般や、あるいはX線天文学に用いる撮像分光器として、X線マイクロカロリメータのアレイが必要である。我々の研究グループは、10 keV以下のX線帯域で動作する超伝導転移端 (Transition Edge Sensor; TES) 型X線マイクロカロリメータ (TES カロリメータ) を in-house で開発している。TES カロリメータは温度計である TES と X 線吸収体で構成されており、高開口率を実現するためには吸収体の大面積化が求められる。我々は2022年に、260 μm 角の大面積 Au 吸収体を複数の柱で支えた構造を持つ「マッシュルーム型吸収体 TES カロリメータ」の製作に成功した。しかし、原理的なエネルギー分解能が半値全幅で 4.8 eV@5.9 keV であるのに対し実測のエネルギー分解能は 9.4 ± 3.0 eV と乖離があり、設計目標の 5 eV 以下を満たせていない。

本修士論文では、性能評価及び電熱シミュレーションを行うことでマッシュルーム型吸収体 TES カロリメータのエネルギー分解能を劣化させている原因を評価した。まず X 線照射試験の結果からベースライン分解能が 8 eV あることがわかり、ノイズ測定を行うことでベースライン分解能を劣化させている主な原因が Readout noise と Excess noise であると結論づけた。次に有限要素法による電熱シミュレーションを行い、Au 吸収体の面積が大きいことによるパルス波形のばらつきがエネルギー分解能に与える影響を評価した。その結果、現在の Au 吸収体の熱伝導率では X 線入射位置によるエネルギー分解能の劣化は 0.09 eV であり、パルス波形のばらつきによる影響は小さいと評価できた。さらに将来的に製作したいと考えているマッシュルーム型吸収体の構造を電熱シミュレーションすることで製作にフィードバックを行った。現在の吸収体面積の4倍の構造や、衛星応用を目指した Bi/Au 二層吸収体についても、熱伝導率の観点からは現在の製作条件で実現可能であると判断した。

また、衛星応用では X 線イメージを取得することが重要な物理現象の解明に繋がる。銀河団の大規模な運動の様子やダークバリオンの候補となっている空間に広がる中高温銀河間物質などを検出するには、高エネルギー分解能と高解像度の両方が要求される。しかし TES カロリメータで高画素化 ($\sim 10^6$ ピクセル) を行うには、TES 自身の発熱によりピクセル数が制限されている。そのため、TES の数を増やすことなく、画素数を増やすことが可能な位置検出型 TES カロリメータ (Hydra 型 TES カロリメータ) の開発が求められる。Hydra 型 TES カロリメータは一つの TES に対して複数の吸収体を持っており、最適フィルタ処理を適用するためには個々のピクセルのイベントを同定する必要がある。本修士論文では製作した Hydra 型 TES カロリメータの動作検証と、機械学習を用いた各ピクセルのパルスイベント分類に取り組んだ。その結果、Deep Learning の生成モデルである変分オートエンコーダを用いることで各ピクセルのイベントを 90% 以上の精度で分類できることを検証した。