

X線マイクロカロリメータのための断熱消磁冷凍機の開発

金沢大学 自然科学研究科 数物科学専攻
宇宙物理研究室 修士1年 國久哲平

宇宙に存在する高温・高エネルギー天体(ブラックホール、超新星残骸、銀河・銀河団)はX線を放射している。またX線帯域には酸素、マグネシウム、ケイ素、硫黄、鉄など主要元素のK輝線が存在している。これらのX線を精密分光することで放射体の物理・運動状態、元素組成、元素量を調べることができ、そして宇宙における物質の3次元マップを製作し、宇宙の構造と進化を観測的に明らかにすることが我々の目的である。そのために次世代X線天文衛星への搭載を目指し、超伝導遷移端を利用したTES(Transition Edge Sensor)型マイクロカロリメータの開発をISAS/JAXA、首都大学東京とともに進めている。

X線マイクロカロリメータは入射光子一つ一つのエネルギーを素子の温度上昇として測定する検出器である。0.1K以下の極低温で動作させることで $E/\Delta E > 1000$ の分解能を実現し、2014年打ち上げ予定のAstro-H衛星には温度計として半導体サーミスタを用いたカロリメータが搭載される。また温度計として、先に述べたTESを使用することでさらなる分解能の向上が可能となる。0.1Kという極低温環境を作り出すためには断熱消磁冷凍機(ADR)が必要である。ADRは冷媒である磁性体に対し、印加磁場を制御しエントロピー操作を行う

ことで極低温を実現する。また、重力依存性がないことから宇宙空間で使用可能であり、衛星搭載用の冷凍機として用いられている。金沢大学は昨年度より、温度安定度 $\sigma = 10\mu\text{K}$ 以下で温度を制御すること、また100mK以下に冷却して10時間以上保持することを目標に、X線マイクロカロリメータ動作のための断熱消磁冷凍機を開発を行っている。

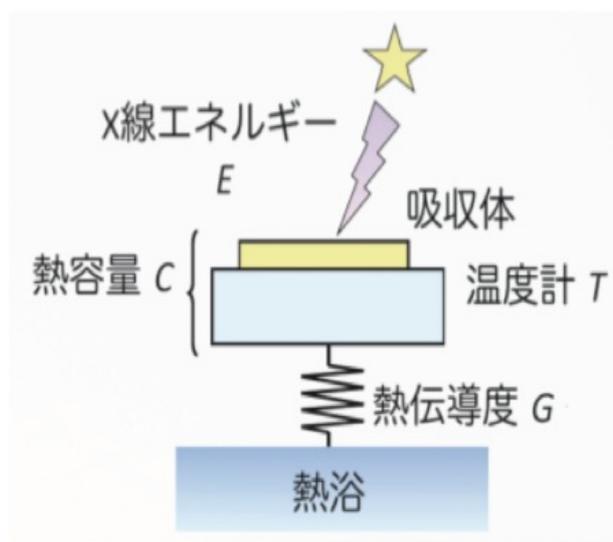


図1: X線マイクロカロリメータの構造

X線マイクロカロリメータの読み出しには SQUID (超伝導量子干渉計) と呼ばれる高感度の磁場測定素子を用いる。SQUID はリング状の超伝導体でできており、リングを貫く磁束を電圧として読みだす。TES と直列にコイルを繋ぐと、X線光子が入射したときに生じる TES の微小な抵抗変化も読み出すことができる。

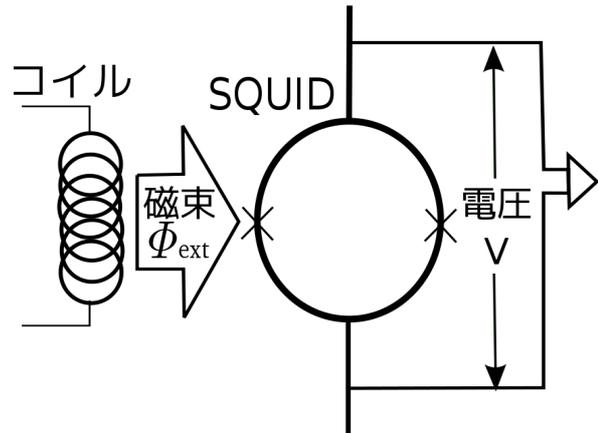


図 2 : SQUID を用いた X 線マイクロカロリメータの読み出し系

昨年度の状況として、クライオスタットに自作の磁性体カプセルを組み込み、高温側からの放射の漏れを防ぐことで、最低到達温度

90mK、100mK 以下で 7 時間保持、温度制御時の温度安定度 $\sigma = 16\mu\text{K}$ を実現した。その後、さらなる冷却性能改善を目指して多層断熱材 (MLI) の設計を見直し、クライオスタット内部配線の設計を見直した。その結果、最低到達温度 80mK、100mK 以下で 7 時間以上保持、温度制御時の温度安定度 $\sigma = 9\mu\text{K}$ を達成し、X線マイクロカロリメータ動作に必要な冷却性能をほぼ実現できた。現在では自作の ADR を使った X線マイクロカロリメータの動作に移行しつつある。TES については、抵抗-温度特性を評価した。その結果、図 3 のように超伝導体遷移途中での微小抵抗を測定することができ、抵抗-温度特性を評価出来た。しかし、過去に同一素子を希釈冷凍機で測ったときの結果と比べて遷移はゆるやかであることが分かる。これについては素子の劣化の可能性も含めて原因を検討中である。

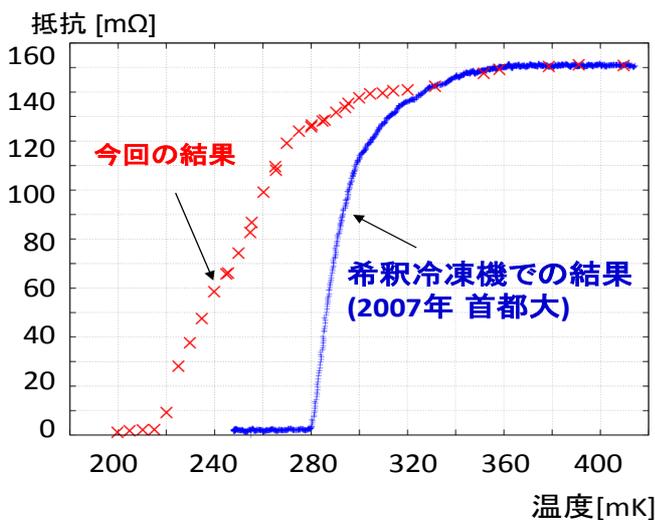


図 3 : TES の抵抗-温度特性。

SQUID については、ADR クライオスタットに設置して動作確認を行なった。SQUID は高感度である反面、電氣的、磁氣的なノイズに影響を受けやすい。そこで、SQUID に磁気遮蔽を施す、すべてのケーブルにバンドルシールドを施す、すべての配線にフィルター回路を挿入する、クライオスタットと計測装置のグラウンドの取り方に細心の注意を払う、といったノイズ対策を実施して動作確認を行なった。その結果、図 4 のような磁束-電圧特性が得られ、ADR クライオスタットで SQUID の動作が確認できた。

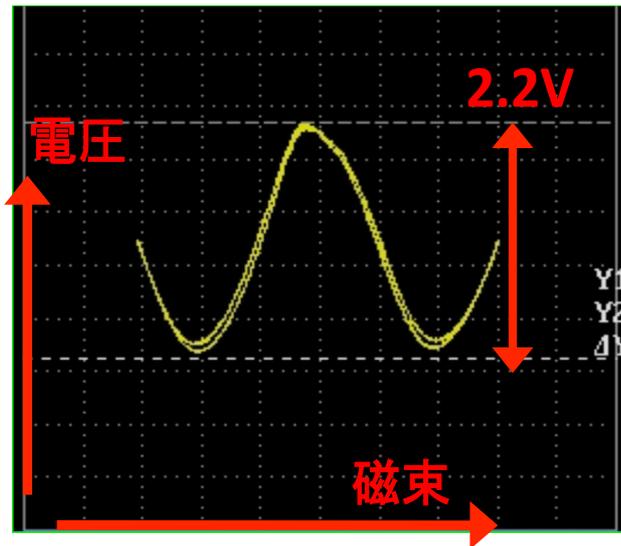


図 4 : SQUID の磁束-電圧特性。

今後の予定としては、実際に TES の抵抗変化を SQUID で読み出す、X 線パルスの検出といった事に取り組んでいく。