

## 断熱消磁冷凍機上での TES 型 X 線マイクロカロリメータの 分光性能の向上

小竹 美里 (金沢大学大学院 自然科学研究科 修士 1 年)

### Abstract

X 線マイクロカロリメータは入射 X 線光子 1 つ 1 つのエネルギーを素子の温度上昇として計測する検出器であり、100 mK 以下の極低温で動作させることにより、 $E/\Delta E > 1000$  の優れたエネルギー分解能を実現する。中でも、超伝導遷移端を高感度の温度計として利用した TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータはエネルギー分解能の更なる向上が見込めるため、DIOS 衛星等の次世代 X 線観測衛星への搭載が考えられている。軌道上で 100 mK 以下の極低温を実現するには断熱消磁冷凍機 (ADR) が最も現実的であるが、冷却サイクル中に強い磁場を発生するため、超伝導を利用した TES カロリメータとの干渉が問題となりうる。そこで、我々は冷凍機とセンサを一体のシステムとして開発している。昨年は、自作 ADR の超伝導マグネットに対する磁気シールドの改良により急峻な超伝導遷移特性が得られたことを報告したが、5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能は 17 eV (FWHM) にとどまり、目標性能である数 eV には達していなかった。本研究ではさらなる分光性能の向上を目指して、クライオスタットと信号読み出し回路のヘッドアンプ、その他の駆動装置、計測装置とを接続するケーブルのシールドや各装置の接地方法を見直してノイズを低減し、センサの温度制御 (温度安定度) の改善に努めている。また、センサの周囲に施した超伝導体と強磁性体の二重磁気シールドの材質・組合せを変えて性能の違いを実験的に調べ、最適化を図っている。その結果、エネルギー分解能は  $3.8 \pm 0.4$  eV まで向上した。

### 1 はじめに

現在の宇宙はダークエネルギーとダークマターが支配しており、バリオンはわずか 4% にすぎない。さらに、そのバリオンについても半分以上が未検出であり、この未検出のバリオンはダークバリオン (ミッシングバリオン) と呼ばれ、宇宙の大規模構造に沿って  $10^5 \sim 10^7$  K のガス (WHIM: Warm-hot intergalactic medium) として存在することが、計算機シミュレーションにより示唆されている (Cen & Ostriker 1999)。WHIM の存在を観測によって確かめることは、ダークバリオン問題に加え、宇宙の大規模構造の形成と熱的進化の解明につながる。

WHIM は密度が低く、熱制動放射による連続成分は弱く銀河系的前景放射に埋もれて観測できないため、WHIM に含まれる重元素からの輝線を捉えることが必要となる。そのためには、 $E/\Delta E \sim 1000$  以上の高い分光性能を持ち、広がった天体であっても分光性能が劣化しない X 線撮像検出器が必要となる。

このような要求を満たす X 線検出器として最も有力なのが TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータであり、現在、WHIM の観測を目的として、TES カロリメータを搭載した DIOS 衛星が計画されている (Ohashi et al. 2012)。

X 線マイクロカロリメータは、入射 X 線光子 1 つ 1 つのエネルギーを素子の温度上昇として計測する検出器である。0.1 K 以下の極低温で動作させることで  $E/\Delta E > 1000$  の優れたエネルギー分解能を実現し、精密な X 線分光観測が可能となる。図 1 に X 線マイクロカロリメータの模式図を示す。吸収体に X 線光子が入射すると吸収体の温度が僅かに上昇し、その熱は熱リンクを通して熱浴へ流れ熱平衡に戻る。このときの僅かな温度上昇を読み取ることで、入射 X 線光子のエネルギーを測定する。カロリメータの原理的なエネルギー分解能は、素子の温度揺らぎと温度計のジョンソンノイズにより決まり、半値全幅換算で

$$\Delta E_{\text{FWHM}} = 2.35\xi\sqrt{k_bTC} \quad (1)$$

と表される。ただし、 $\xi$  は温度感度  $\alpha \equiv d \ln R / d \ln T$  に依存する係数であり、 $\xi \propto \frac{1}{\sqrt{\alpha}}$  である。TES 型とは、温度計として超伝導薄膜が常伝導から超伝導に遷移する際の急激な抵抗変化を利用したもので、 $\alpha \sim 100-1000$  の高い温度感度を持ち、従来型に比べ更なるエネルギー分解能の向上が見込めるとともに、大規模アレイ化にも適している。

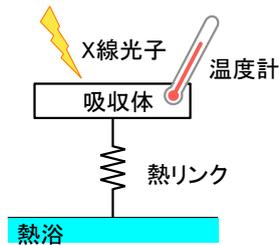


図 1: X 線マイクロカロリメータ模式図

軌道上で極低温を実現するには、重力依存性の無い断熱消磁冷凍機 (ADR: Adiabatic Demagnetization Refrigerator) がもっとも現実的である。しかしながら、ADR は強い磁場を発生させるため、TES カロリメータと信号読み出しに用いる SQUID 電流計への影響が問題となる。そこで我々は、次世代の X 線天文衛星への搭載を念頭に置いて、TES 型 X 線マイクロカロリメータと ADR を一体のシステムとして、動作環境の構築を行ってきた (神谷 2014)。昨年は、超伝導マグネット周りに配置した磁気シールドの改良により、当初鈍っていた超伝導遷移端が鋭く改善したことを報告した。しかし、エネルギー分解能 5.6 eV (FWHM) の TES 素子を使用した X 線検出実験では、5.9 keV の X 線に対して 17 eV (FWHM) と本来の性能より数倍悪いものであった (高倉 2013)。本研究ではさらなる分光性能の向上を目指し、計測機器・信号読み出し回路などの配線・接地方法を見直すことで電気的ノイズの低減を行った。さらに、センサの周囲に施した超伝導体と強磁性体による 2 重の磁気シールドの見直しを行うことで、磁氣的ノイズの低減を行った。

## 2 実験装置

ADR クライオスタットの He 温度ステージには自作 ADR や TES カロリメータ、超伝導量子干渉計 (SQUID) が搭載されている。図 3 に He 温度ステージの様子とその模式図を示す。検出器は冷媒である磁性体と熱的に接続されている。超伝導マグネットの磁場は最大 3 T に達するため、その周りを 12 mm 厚の SiFe 磁気シールドで囲んで地磁場程度まで落とし、さらに検出器周りと SQUID 電流計周りを超伝導体と強磁性体の二重の磁気シールドで囲み、地磁場の影響を抑える。

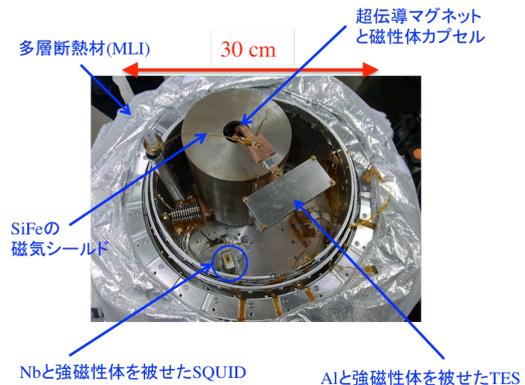
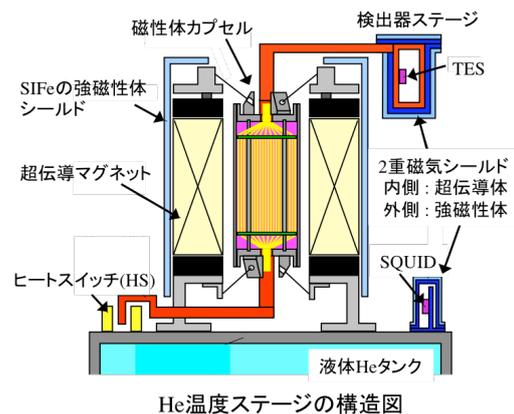


図 2: He 温度ステージの様子



He温度ステージの構造図

図 3: ADR 模式図

### 3 動作環境の改善

#### 3.1 ノイズ対策の強化

これまでもクライオスタットと室温部の回路をつなぐケーブルには二重のシールドを施しクライオスタットのすべてのコネクタに EMI フィルタを入れるなどの対策はとってきた。しかしながらこれらの見直しを行ったところ不十分なところが見つかったので、改修を行った。まず、各ツイストペアの個別シールドは原則として出し側でのみ筐体に接続し、受け側では接続しない。一方、ハーネス全体を覆うバンドル（外部）シールドは ADR クライオスタットと計測機器筐体の両側に明示的に接続し、全体がファラデーケージとなるようにした。コネクタシェルはすべて金属製のしっかりしたものに置き換え、シールドがコネクタシェルの中までしっかり引き込まれるようにした。計測機器の筐体はハーネスのシールドを通してクライオスタットに接地し、またグラウンドループが出来ないように注意した。建物の電源コンセントと計測装置の間にはノイズカットトランスを入れ、クライオスタットはノイズカットトランスの筐体を経由して建物に接地するようにした。これらの対策後の室温部配線系統図を図 4 に示す。これらのノイズ対策を行った結果、信号読み出し系のノイズスペクトルは 75% 程度に減少し、1 kHz 以上の周波数帯域に見られたスパイク状の成分が無くなった。

対策前後のノイズ波形とスペクトルを図 6 に示す。

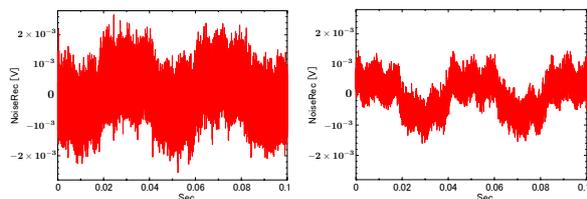


図 5: ノイズ対策強化前と強化後のノイズ波形の比較

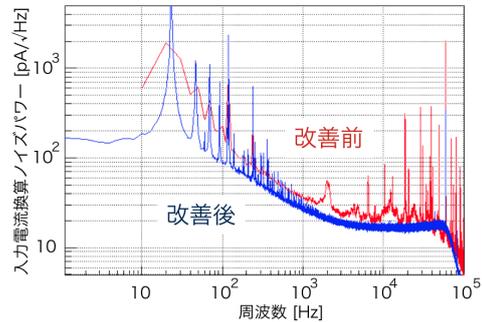


図 6: 信号読み出し系のノイズスペクトル

#### 3.2 二重磁気シールドの最適化

検出器は磁場に対して非常に弱く、地磁場や ADR から生じる磁場を防ぐために、超伝導マグネットと検出器の周りをそれぞれ磁気シールドで囲んでいる。Hishi et al. (2014) では超伝導マグネット周りの磁気シールドを改良することで、急峻な遷移曲線が得られた。しかし、検出器周りの磁気シールドについては十分調査できておらず、磁場環境にはまだ改善の余地がある可能性がある。そこで、検出器周りに配置された強磁性体（クライオパーム）と超伝導体（アルミ）の二重磁気シールドについて内側/外側の組み合わせを変更し、センサの性能がどのように変化するかを調べた。図 7 は TES の抵抗-温度特性を比較した結果である。内側が超伝導体で外側が強磁性体の組み合わせの方が若干急峻な転移カーブになっていた。また、エネルギー分解能も若干良い値が得られた。また再現性の確認が十分でないため現時点で結論づけることはできないが、内側を超伝導体、外側を強磁性体とする方がより良いシールド効果が得られている可能性がある。

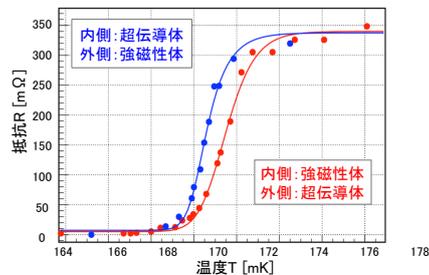


図 7: TES の抵抗-温度特性

