

# 自作断熱消磁冷凍機を用いた TES 型 X 線カロリメータの開発

海道 司 (金沢大学大学院 自然科学研究科 数物科学専攻 修士 1 年)

## Abstract

X 線マイクロカロリメータは入射光子 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、0.1 K 以下の極低温で優れたエネルギー分解能を実現する。中でも TES 型は、超伝導遷移端を高感度の温度計として利用する次世代型検出器として最も注目されている。我々は将来の X 線天文衛星搭載を念頭に置き、微小重力下で安定して極低温を実現する断熱消磁冷凍機 (ADR) をカロリメータと一体で開発している。昨年は 5.9 keV の X 線に対し  $3.8 \pm 0.4$  eV (FWHM) の分解能達成を報告した。その後、安定した素子評価環境の実現を目指し、さらなる ADR の改善に努めてきた。

## 1 はじめに

### 1.1 X 線天文学

銀河団はダークマターの重力ポテンシャルによって数 100~1000 もの銀河、1 億度の高温プラズマが閉じ込められた宇宙最大の天体で、宇宙年齢をかけて小さな銀河団が衝突、合体を繰り返して形成してきた。これを観測的に知るためには X 線を放射する高温プラズマの運動 (100~ km/s) をドップラー効果によるエネルギーシフトによって捉え、放射体の運動状態を調べることが必要である。しかし、その観測には優れた分光性能を持ち、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であり、この要求を満たす X 線検出器として最も有力なのが TES 型 (Transition-Edge-Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータである。我々は、X 線検出器とその動作のための極低温を実現する断熱消磁冷凍機 (ADR) を一体となって開発している。

### 1.2 X 線マイクロカロリメータ

X 線精密分光の要求性能を満たす検出器としては X 線マイクロカロリメータがある。これは入射 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検出し、0.1 K 以下で動作させることで  $E/\Delta E \sim 1000$  のエネルギー分解能を実現する。図 1 はカロリメータの模式図である。吸収体に X 線光子が入射して起こる僅かな温度上昇を読み取ることで、エネルギー

を測定するというものである。吸収体で発生した熱は熱浴へと流れ、再び熱平衡状態になる。

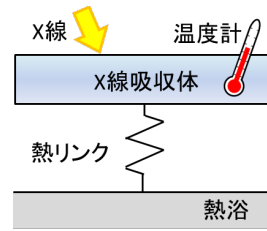


図 1: X 線マイクロカロリメータ模式図

カロリメータに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で決まっており、半値全幅 (FWHM) は

$$\Delta E = 2.35 \sqrt{\frac{k_B T^2 C}{\alpha}} \quad (1)$$

と表され、式から熱容量  $C$  は温度を下げると小さくなり、 $T, \alpha$  に依存することがわかる。ここで  $\alpha$  は温度計の感度を示し、

$$\alpha = \frac{d \log R}{d \log T} \quad (2)$$

と定義される。従って、優れたエネルギー分解能を実現するためには極低温、高感度の温度計の利用が必要となる。我々が扱っている TES 型は、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高感度の温度計として利用しており、カロリメータのなかでも高感度である ( $\alpha \sim 100 - 1000$ )。数 ~mK

の遷移端内に動作点を安定に保つため、定電圧バイアスで動作させ強い負の電熱フィードバックをかけて使用する。(図 2)

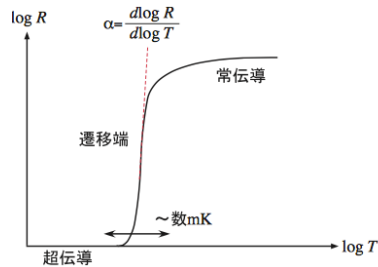


図 2: TES の R-T 曲線

れまで開発を進めてきた。2014 年にノイズ環境・検出器周りの磁気シールドの改善によって、エネルギー分解能 3.8 eV を実現した (小竹 2014)。

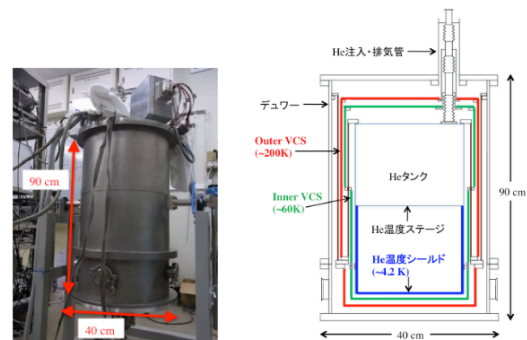


図 3: クライオスタットの外観と模式断面

## 2 断熱消磁冷凍機 (ADR)

### 2.1 概要

微小重力下でも安定して極低温環境を作り出すには、重力依存性がない断熱消磁冷凍機 (ADR) が最も現実的である。ADR は常磁性体に磁場を印加させて磁気エントロピーを下げ、磁化熱を排熱して断熱消磁により冷却する。図 3 には我々が現在開発しているクライオスタットの外観と模式断面、図 4 にはエントロピーと温度の相関曲線、図 5 には、ADR の構造と He 温度ステージの模式図を示した。

ADR クライオスタットは 40 cm×90 cm の小型デューワー (300 K の真空容器)、二重の蒸気冷却型放射シールド、容量 7 L の He タンクで構成されている (Shinozaki et al. 2012)。冷却過程は、まず常磁性体が熱的に熱浴と接した状態で励磁する (A→B)。次に断熱状態にした後に熱浴と切り離して消磁することで目標温度まで冷却する (B→C)。その後は温度保持するように消磁し、その間検出器を動作させ X 線を観測する (C→D)。現在の ADR は、磁化熱を排熱して最低温度に到達するまでの時間 (~7 時間) が観測時間 (~20 時間) に対して非常に長い。これは、ADR の運転効率を低下させるため改善が要求される。

TES は超伝導遷移端を利用しており、磁場の影響を受けやすいが、ADR は冷却過程で強磁場を発生させるため、TES 型カロリメータと ADR を一体のシステムとして動作環境を整えることが重要としてこ

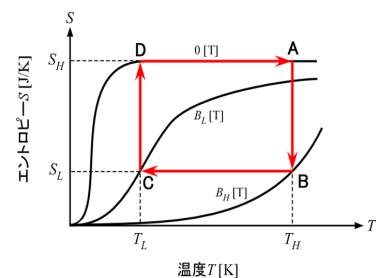


図 4: エントロピーと温度の相関曲線

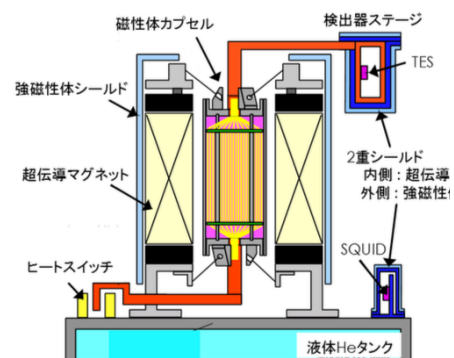


図 5: ADR の構造と He 温度ステージの模式図

### 2.2 温度制御

カロリメータが画期的な分解能を実現するには、動作中に高い精度でセンサ温度を一定に保つ必要があ

る。昨年度は温度安定度は  $4\text{--}18 \mu\text{Krms}$  であったが、先行研究の温度制御のプログラムを改良し、現在は同様のセットアップで  $1\text{--}2 \mu\text{Krms}$  の温度安定度を達成している。温度制御の詳細な結果は伊東 (2015) で述べている。

### 3 エネルギー分解能評価

動作環境の評価に使用した TES 素子は首都大で製作させた TMU146-4d である。これは  $4 \times 4$  の 16 ピクセルでアレイ化されており、各単素子は  $200 \mu\text{m}$  角の Ti(超伝導金属) と Au(常伝導金属) の二層薄膜の上に  $120 \mu\text{m}$  角の Au 吸収体が乗っている構造である。首都大希釈冷凍機上では  $5.9 \text{ keV}$  の X 線に対し  $2.8 \text{ eV}$ (FWHM) の性能が確認されている (Akamatsu et al. 2009)。

現在我々の ADR では、 $3.8 \pm 0.2 \text{ eV}$  が確認されている。温度ゆらぎの改善によってエネルギー分解能の安定度は高まったが、分解能の向上には至らなかった。温度安定度は十分改善したため、素子本来の性能を制限しているのは温度安定度とは別の原因と考えて、今後その点を明らかにしていく。

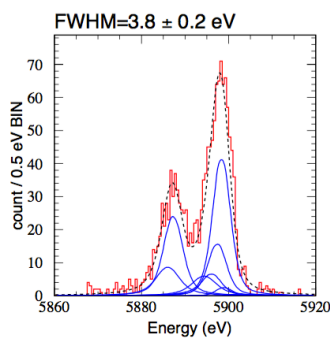


図 6: 取得したエネルギースペクトル図

### 4 排熱問題への原因追究

排熱問題の原因追究に向け、以下のことに取り組んだ。

#### 4.1 磁性体カプセル材料の計算

磁性体カプセルに使用されている材料の熱容量を計算した。結果を図 7 に示す。排熱温度域では SUS の熱容量が大きい結果を得た。これは材料として使用している SUS304 は低温で磁性を帯びるため、最大  $3 \text{ T}$  の磁場印加がある排熱過程で、磁性による磁気比熱の効果は無視できないためだと考えた。そこで磁場中で SUS 比熱を測定した。結果を図 8 に示す。排熱時の温度域  $2\text{--}10 \text{ K}$  で、磁場  $0 \text{ T}$ ,  $3 \text{ T}$  の SUS 比熱の違いは小さく、SUS が長い排熱時間の寄与としては小さいことを突き止めた。

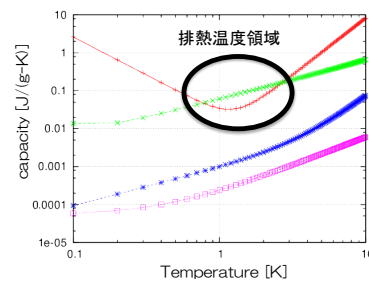


図 7: 磁性体カプセル材料の熱容量計算結果

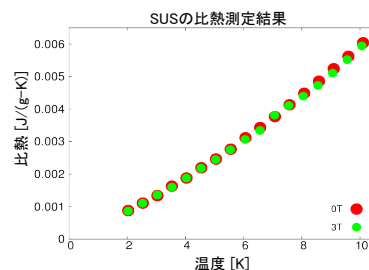


図 8: SUS 比熱の測定結果

#### 4.2 排熱経路の温度分布

排熱経路の温度分布を較正温度計で確認した。温度計を設置した場所は、検出器ステージ、ヒートスイッチの磁性体カプセル側(設置箇所 A)、ヒートスイッチの熱浴側(設置箇所 B)の 3 箇所である(図 9)。ただし、温度計の読み出しは同時に 2 つまでしか行えない。そこで、検出器ステージの温度は常時読み出し、設置箇所 A, B はそれぞれ別日に測定した(A,

B を測るために用いた温度計は同じ)。排熱時の温度分布の結果を 10, 11 に示した。励磁を終了した時間を  $x$  軸の原点にとっている。

検出器ステージの温度は 20150406 では  $\sim 2.5$  K, 20150430 では  $\sim 2.1$  K であり, その差は  $\sim 0.4$  K である。一方でヒートスイッチ間では温度差が  $\sim 0.8$  K の温度差があり, ヒートスイッチ間で少なくとも  $\sim 0.4$  K の温度差があることを確認し, ヒートスイッチ間で優位な温度差が生じていることを突き止めた。あわせて, 磁性体カプセルと検出器ステージの間で大きな温度差はないことも明らかになった。この結果を受け, ヒートスイッチ表面を研磨し熱伝導度向上を図ったが, 排熱時間の問題解消にはつながらなかった。

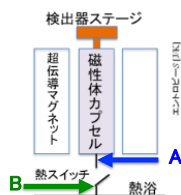


図 9: 温度計の設置箇所

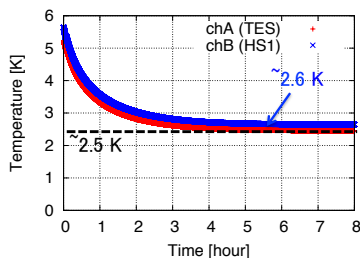


図 10: TES ステージと場所 A の温度分布 (150406)

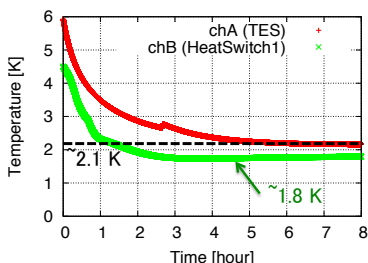


図 11: TES ステージと場所 B の温度分布 (150430)

### 4.3 熱浴温度

熱浴温度が長い排熱時間の原因として, 減圧用ポンプを排気量の大きいものに変更した。ポンプ変更前と変更後の検出器ステージの温度分布を図 12 に示した。熱浴温度は 2 K を切り ( $\sim 1.66$  K), 従来のポンプに比べ熱浴温度は下がり排熱時間は実質短くなったが, 排熱問題の根本的改善に至っていない。

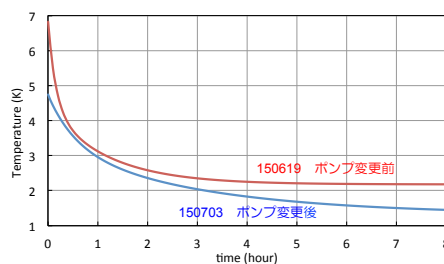


図 12: 減圧用ポンプの違いによる排熱時間

### 4.4 まとめと今後

長い排熱時間の原因として, 磁性体カプセル材料の熱容量には大きな原因はなく, ヒートスイッチ間に問題があると結論付けた。現在は, 減圧用ポンプを排気量の強力なものに変更し運転効率を高めているが, 最適なヒートスイッチのシステムを再設計し, ヒートスイッチの接触熱抵抗を高めて, さらに排熱時間を削減していく。

最後になりましたが, 基礎物理学研究所および国立天文台からのご支援に感謝いたします。このような機会を設けていただきありがとうございます。

## Reference

- Frank Pobell, Matter and Methods at Low Temperatures, Springer 2006
- H. Akamatsu et al. 2009, AIPC 1185, 191
- K. Shinozaki et al. 2008, SPIE 7011, 70113R
- 橋元政哲, 現場で生かす金属シリーズ ステンレス, 工業調査会, 2007
- 谷津貴裕, 修士論文「断熱消磁冷凍機を用いた X 線マイクロカロリメータの動作環境の構築」, 金沢大学, 2012