

自作断熱消磁冷凍機による TES 型 X 線マイクロカロリメータ動作環境の開発

神谷 賢太 (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 つを素子の温度上昇として検出する X 線検出器であり, 100 mK 以下の極低温での動作により $E/\Delta E \sim 1000$ 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する TES 型 X 線マイクロカロリメータは更なる分光性能向上が見込める。我々は, 将来の 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微小重力下で極低温を実現できる断熱消磁冷凍機 (ADR) を両者一体のシステムとして開発を行っている。自作 ADR 上で X 線パルスの検出を行い, 5.9 keV の X 線に対して半値全幅で 3.8 ± 0.4 eV のエネルギー分解能を実現した。

1 はじめに

我々の研究目的は, 宇宙に存在する高温・高エネルギー天体 (ブラックホール, 銀河, 銀河団など) が放射している X 線を精密分光することで放射体の物理・運動状態等を調べ, そこから宇宙の構造と進化を観測的に解明していくことである。

X 線精密分光における要求性能を満たす検出器として X 線マイクロカロリメータが挙げられる。X 線マイクロカロリメータは入射光子 1 つ 1 つを素子の温度上昇として検出する X 線検出器であり, 100 mK 以下の極低温で動作させることで $E/\Delta E \sim 1000$ の優れたエネルギー分解能を実現する。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, その後は熱的にリンクした熱浴 (<100 mK) へ熱が流れ, 熱平衡状態に戻る。この時の僅かな温度上昇を温度計で読み取ることで, X 線光子のエネルギーを測定する。

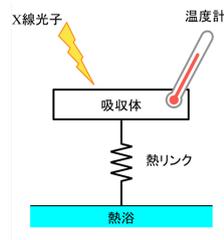


図 1: X 線マイクロカロリメータの模式図

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で決まり, 半値全幅 (FWHM) で

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

と表される。ただし, α は温度計の感度を示し, $\alpha \equiv \frac{d \log R}{d \log T}$ である。吸収体の熱容量 C は温度を下げるほど小さくなるので, この式は T, α に強く依存することになる。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 ($T \sim 100$ mK) で動作させ, 高感度の温度計を使用することが必要となる。2015 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 X 線マイクロカロリメータが搭載される (Mitsuda et al. 2012)。

TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータは, 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 (図 2) を高感度の温度計として利用しており, $\alpha \sim 100-1000$ 程度の感度をもつ。数 mK の遷移端内に動作点を安定に保つために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 (Irwin et al. 1995)。2010 年代打ち上げを目指す DIOS 衛星は TES 型 X 線マイクロカロリメータを搭載予定であり (Ohashi et al. 2012), 我々は JAXA 宇宙科学研究所や首都大学東京のグループと協力して開発を進めている。

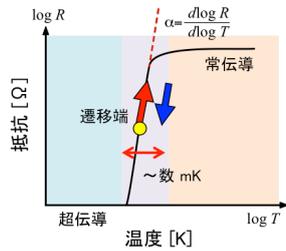


図 2: TES の抵抗-温度特性

人工衛星上で極低温環境をつくり出すには、断熱消磁冷凍機 (ADR) が最も現実的である。ADR は冷媒である常磁性体に磁場を印加してエントロピーを制御することで冷却を行うため、重力依存性がなく宇宙空間で使用可能である。また、温度安定度にも優れる。冷却過程は、まず常磁性体が熱的に熱浴と接した状態 (熱スイッチ On) で励磁する。この時発生する磁化熱 $T_H(S_H - S_L)$ は熱浴に排熱し、等温に保つ (図 3 右図 A → B 過程)。次に、断熱状態にした後に熱浴と切り離して (熱スイッチ Off) 消磁することで目標温度まで下げる (図 3 右図 B → C 過程)。その後は等温を保つように消磁を行う (図 3 右図 C → D 過程)。この時の吸熱量は $T_L(S_H - S_L)$ で与えられる。カロリメータの動作はこの過程で行う。

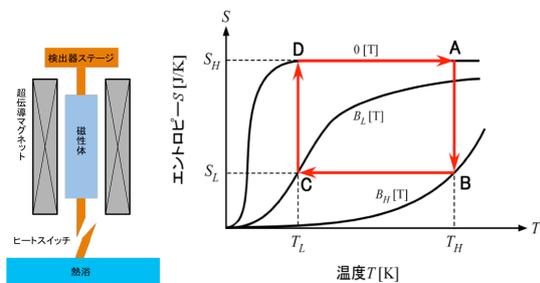


図 3: ADR の模式図 (左図), エントロピー-温度曲線における断熱消磁冷却サイクル (右図)

TES は超伝導遷移端を利用するため、磁場の影響を受けやすい。一方で、ADR は冷却サイクルにおいて強い磁場を発生させる。従って、TES 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であると考え、開発を進めてきた。その結果、5.9 keV の X 線に対してエネルギー分解能 $\Delta E = 3.8 \pm 0.4$ eV (FWHM) を実現できるようになった。本論文では我々の ADR と TES カロリメータ動

作環境について述べる。

2 自作断熱消磁冷凍機 (ADR)

図 4 に我々の研究室で使用している ADR クライオスタットの外観と構造図を示す。ADR クライオスタットは直径 40 cm × 高さ 90 cm の小型デュワー (300 K の真空容器), 2 重の蒸気冷却型放射シールド (VCS: Vapor-Cooled Shield), He 温度シールド, 容量 7 L の He タンクで構成されている (Shinozaki et al. 2012)。He タンクへの侵入熱を抑えるために、各シールドの間には多層断熱材 (MLI: Multi Layer Insulator) を挿入しており、7 L の液体 He を 2 日間保持可能である。

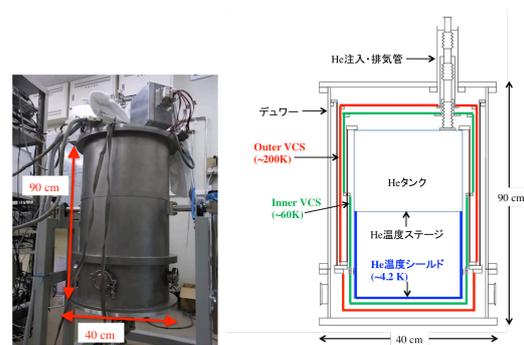


図 4: クライオスタットの外観と模式断面

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 5 に He 温度ステージの様子, 図 6 にその模式図を示す。ADR は超伝導マグネット, 磁性体カプセル (ソルトピル), ヒートスイッチで構成されている。超伝導マグネットに最大電流 9 A 印加時に 3 T の磁場が発生するため、磁場対策としてマグネット周囲に 12 mm 厚の強磁性体 (SiFe) シールドを設けている (Hishi et al. 2014)。これにより、マグネットからの漏れ磁場を地磁場程度まで抑えることができる。さらに、TES カロリメータを搭載した検出器ステージと SQUID 周囲のそれぞれに超伝導体と強磁性体の 2 重磁気シールドを設けている。

磁性体カプセルはケースの製作, 結晶の成長ともにインハウスで行っている。常磁性体の結晶には磁気モーメントが大きく、磁気相転移温度が 100 mK より十分に低い (0.026 K) 鉄ミョウバンを採用してい

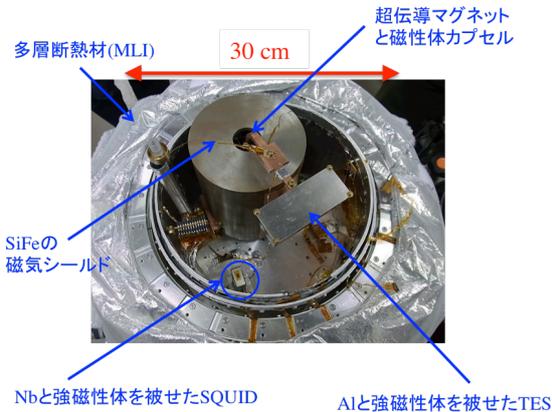


図 5: 自作 ADR を設置した He 温度ステージ

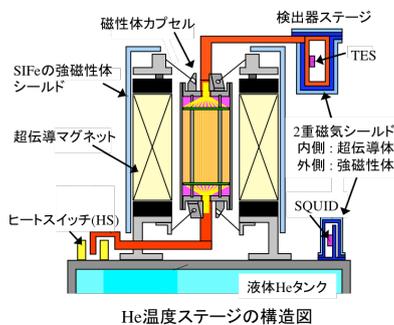


図 6: ADR と He 温度ステージの模式図

る。図 7 に磁性体カプセルの断面を示す。結晶内の熱伝導をよくするためにケース内部には金線を這わせ (359 × 2 = 718 本), 両側の銅リンクには金メッキを施している。筒と蓋にはステンレスを使用し, 溶接により結晶を密封している。検出器ステージ側無負荷の状態, 熱浴温度 1.7 K (減圧 He 温度) で断熱消磁を行ったところ, 最低到達温度 40 mK 以下, 80 mK 以下での保持時間 20 時間以上という性能を示した。TES カロリメータを動作させる上では十分な冷却性能である。

3 温度制御

温度制御の模式図を図 8 に示す。検出器ステージ上に設置した温度計 (RX202A) を常にモニタし, PID 制御によって超伝導マグネットに流す電流を制御している。これにより検出器ステージ上では 6 μ K rms の温度ゆらぎが実現できている。

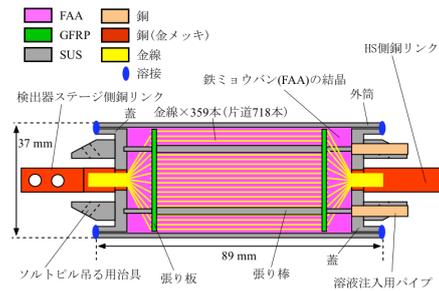


図 7: 磁性体カプセルの断面

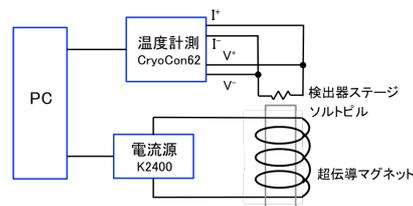


図 8: 温度制御の模式図

4 TES カロリメータ動作

4.1 素子のセットアップと駆動, 信号読み出し

TES カロリメータ素子は ^{55}Fe 線源, 温度計とともに検出器ステージである銅板に固定し (図 9), 銅製のカバー, 超伝導体 (アルミまたはニオブ) と強磁性体 (クライオパーム) の 2 重磁気シールドを被せて, 磁性体カプセルからのぼしたコールドフィンガーの先端にマウントする。

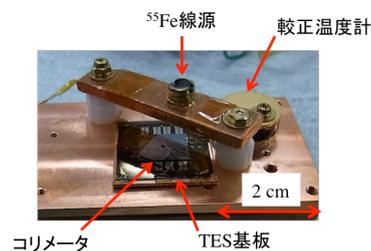


図 9: 検出器ステージのセットアップ

TES カロリメータの動作回路では, TES の抵抗に対して十分に小さい抵抗値をもつシャント抵抗 R_s を TES と並列にして定電流を流すことで擬似的に定電圧バイアスを表現している。我々の実験での典型

的な値は, TES の常伝導抵抗 $\approx 100 \text{ m}\Omega$, 動作抵抗 $\approx 10 \text{ m}\Omega$, $R_s \approx 2 \text{ m}\Omega$, 寄生抵抗 $\approx 1 \text{ m}\Omega$ である。

X 線光子が入射すると TES の抵抗が変化し, 定電圧バイアスされた TES を流れる電流が変化する。この電流変化を SQUID で読み出している。SQUID とシャント抵抗は発熱の影響を避けるため, He 温度ステージに設置している。

TES カロリメータ, SQUID の駆動部と信号読み出し部の模式図を図 10 に示す。トリガのかかったパルス波形と入力のない時のノイズ波形をそのまま取り込み, パソコン上で最適フィルタ処理を行うことで波高値を求める。計測装置とクライオスタットの接続については小竹 (2014) で述べている。

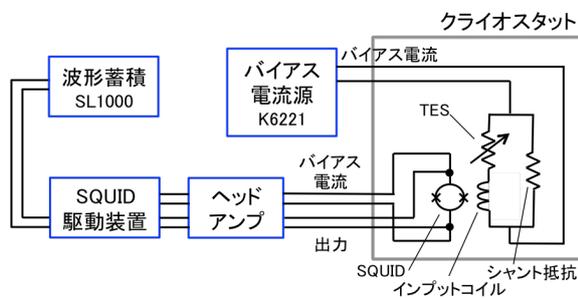


図 10: 駆動部と信号読み出し部の模式図

4.2 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れたもので 4×4 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 吸収体がのっている構造をしている (図 11)。TES 素子の上には $\phi 200 \mu\text{m}$ の穴が開いたカロリメータが設置されている。首都大希釈冷凍機上での測定で 5.9 keV の X 線に対して 2.8 eV (FWHM) の性能が確認されている (Akamatsu et al. 2009)。

上記の素子を用いて性能評価を行った。その結果, 5.9 keV の Mn $K\alpha$ 線に対して, $3.8 \pm 0.4 \text{ eV}$ (FWHM) という値が得られた (図 12)。 $E/\Delta E \sim 1500$ であり, X 線精密分光を行う上では十分な性能を自作 ADR 上で実現することができた。しかしながら, 素子本来の性能は 2.8 eV であり, 更なる改善の余地が残されている。

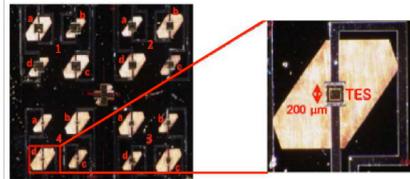


図 11: TES 素子

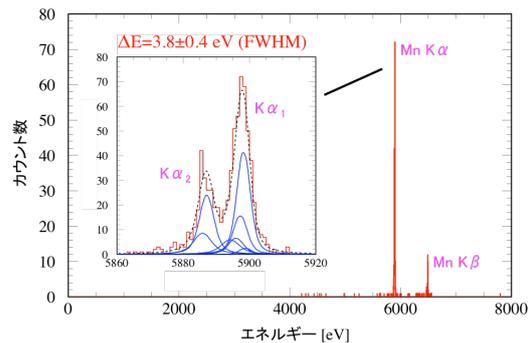


図 12: 得られたエネルギースペクトル

5 まとめと今後

我々は自作 ADR 上で TES 型 X 線マイクロカロリメータの動作環境を整え, 5.9 keV の X 線に対してエネルギー分解能 $3.8 \pm 0.4 \text{ eV}$ (FWHM) を実現し, X 線精密分光を行う上で十分な性能を達成した。まだ改善の余地は残されているものの, 希釈冷凍機に近い性能を実現できている。

今後は更なる分光性能向上を目指すとともに, 地上プラズマ実験への応用を視野に入れ, ADR クライオスタット外部から X 線照射を行えるように改良を進めていく。

Reference

- K.Mitsuda et al. 2012, JLTP 167, 795.
- K.D.Irwin et al. 1995, ITAS 5, 2690.
- T.Ohashi et al. 2012, APIE 8443, 844319
- K.Shinozaki et al. 2008, SPIE 7011, 70113R
- U.Hishi et al. 2014, JLTP 176, 1075
- H.Akamatsu et al. 2009, AIPC 1185, 191
- 小竹美里 2014, 本収録