

自作断熱消磁冷凍機上での X線マイクロカロリメータの性能向上を目指した研究

高倉 奏喜 (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検出器であり、0.1 K 以下の極低温での動作により $E/\Delta E \geq 1000$ のエネルギー分解能を実現する。我々は次世代 X線天文衛星への搭載を目指し、超伝導遷移端温度計を利用した TES (Transition Edge Sensor) 型 X線マイクロカロリメータと、無重力下で 0.1 K 以下を実現する断熱消磁冷凍機 (ADR) の開発を一体で進めている。ADR に関しては十分な冷却性能をもつ磁性体カプセルを自作出来るようになった。5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能は先行研究では 90 eV (FWHM) であったが、超伝導マグネットの磁気シールドを改良することにより、17 eV まで改善した。

1 はじめに

1.1 X線マイクロカロリメータ

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。これらの X 線を精密分光することで放射体の物理・運動状態等を調べることができ、そこから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。

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極めて優れたエネルギー分解能 ($E/\Delta E \geq 1000$) を実現し、精密な分光観測が可能となる。

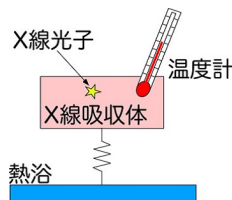


図 1: X線マイクロカロリメータの模式図

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、その後は熱的に接触させた熱浴へ熱が流れ、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。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、半値全幅で

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

と表される (Moseley et al. (1984))。ただし、 ξ は動作点や温度計の感度 $\alpha \equiv \frac{d \log R}{d \log T}$ に依存するパラメータで、 $\alpha \gg 1$ のとき $\xi \propto \sqrt{1/\alpha}$ の依存性を持つ。吸収体の熱容量 C は温度を下げるほど小さくなるので、この式は温度 T に強く依存することになる。従って、動作温度 T を極低温 (~ 0.1 K) にとり、温度計感度を大きくすることが優れた分光性能を発揮するために本質的である。

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カロリメータが搭載される (Mitsuda et al. (2012))。我々は、次世代 X線天文衛星への搭載を目指し、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、超伝導遷移端温度計を利用した TES (Transition Edge Sensor) 型 X線マイクロカロリメータの開発を進めている。 (Mitsuda et al. (2012); Mitsuda et al. (2012); Mitsuda et al. (2012))

1.2 TES 型カロリメータ

TES (Transition Edge Sensor) 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、 $\alpha \sim 100-1000$ 程度の感度をもつ (図 2)。定電圧バイアスを掛けて動作させることで、強い電熱フィー

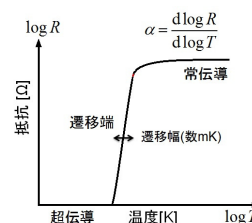


図 2: TES の抵抗-温度特性

ドバックがかかり、安定に動作させることが出来る (Irwin et al. (1995))。

出力は、TES の抵抗値の変化に伴う電流の変化を、ジョセフソン効果を利用した超伝導量子干渉素子 (SQUID) を用いて読み出している。

1.3 断熱消磁冷凍機 (ADR)

0.1 K という極低温環境を作り出すために、断熱消磁冷凍機 (ADR) を用いている。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下げ、断熱状態にした後に磁場を取り去ることで極低温を実現する冷凍機である。重力依存性がないことから宇宙空間での使用に最も適しており、衛星搭載用の冷凍機として用いられている。

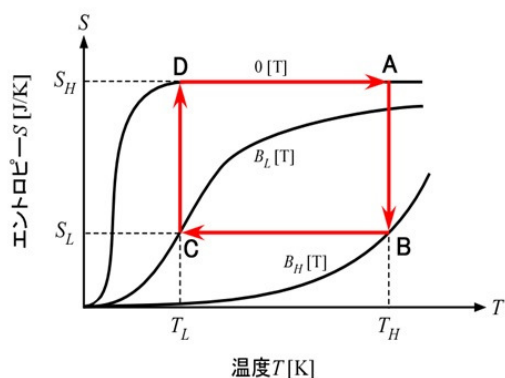


図 3: エントロピー-温度曲線における断熱消磁サイクル

冷却過程としては、まず熱浴と接した状態 (熱スイッチ On) で磁場を印加し、磁化熱を熱浴に逃がす (図 3 過程 A → B)。熱浴に磁化熱を逃がしきった後で熱浴と切り離し (熱スイッチ OFF)、断熱状態にした後磁場を取り去る (図 3 過程 B → C)。この過程でのエントロピーは一定なので、印加する磁場が大きいほど、また消磁開始温度が低いほど、より温度が下がることが分かる。

1.4 本研究の目的と昨年までの状況

TES は超伝導遷移端を利用した温度計であるため、磁場に対して非常に敏感である。対して冷却を行う ADR は、非常に強い磁場を発生させる。人工衛星への搭載を考えた場合、両者を一体のシステムと捉えて開発することが重要であり、我々は ADR の開発も含めて研究を進めている。(Mitsuda et al. (2012))

図 4 は我々の ADR 専用クライオスタットの写真である。液体ヘリウム温度のステージに磁性体カプセル、熱スイッチ、超伝導マグネット、磁気シールドを設置し、磁性体カプセルの低温側にセンサを搭載している。磁場対策のため、センサはさらに 2 重の磁気シールドで覆っている。磁性体カプセルは、ケースの製作、結晶成長とも実験室で自作している。結晶には磁気モーメントが大きく、磁気相転移温度が低い (0.026 K) 鉄ミョウバン (FAA) を使用しており、0.1 K 以下の極低温を実現出来ている。

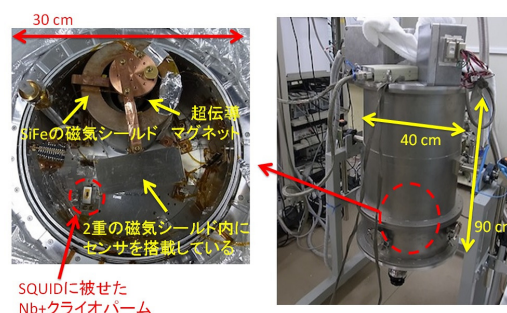


図 4: ADR 外観と内部

これらの測定環境の下で X 線パルス実験を行い、自作の断熱消磁冷凍機での X 線パルス検出に成功した。しかし、エネルギー分解能は 5.9 keV の X 線に対して FWHM で 90 eV ($E/\Delta E \sim 65$) で、半導体検出器の 120 eV を上回ったものの、目標性能である数 eV よりは 1 桁悪いものであった。(菱. (2012))

2 磁性体カプセルの改良

我々は、これまでに 2 つの磁性体カプセルを製作した。2 号機では、冷却能力が大幅に向上したが、密封が不十分で結晶が吹きこぼれてしまい使用不可能になった。また、共通の問題として励磁の際の磁化熱の排熱に長い時間 (~ 5 時間) がかかっていた。

そこで、これらの改良を目指して 3 号機を製作し、性能評価を行った。図 5 に断面図を、図 6 に実際に製作したカプセルの写真を示す。3 号機では、結晶の吹きこぼれを防ぐためにカプセルの上蓋と筒の部分に溶接し、排熱時間を短縮するために内部に這わせる金線の本数をこれまでの倍の 359 本に増やしている。

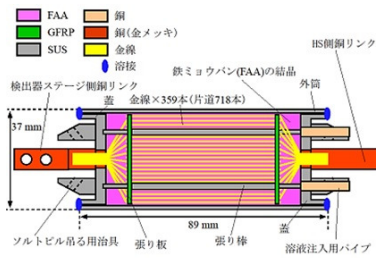


図 5: 磁性体カプセル模式図



図 6: 磁性体カプセル内部と完成品

図 7 に断熱消磁過程の一例を示す。熱浴温度 1.7 K(減圧ヘリウム温度) 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、TES 動作に十分な冷却環境を実現できた。また、熱サイクルをかけても結晶が漏れることはなく、現在も安定に動作している。しかし、磁化熱を排熱す

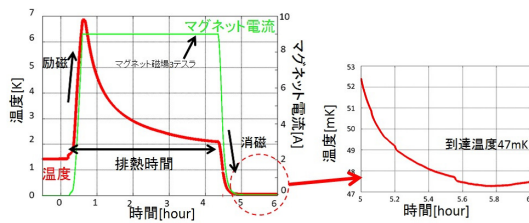


図 7: 断熱消磁過程における温度変化の一例

る時間に大きな改善は見られなかった。ケースに使用しているステンレスの熱容量が大きいことが原因である可能性があり、今後さらに検討を進めていく。

3 磁気環境の改善

エネルギー分解能を制限している原因の一つとして、信号が小さいことが挙げられる。図 8 のプロット 1 は、TES の抵抗-温度特性を評価した結果である。図中に Ref と記したのは、首都大の希釈冷凍機で同じ素子を測った結果であり、我々の ADR 上では TES の転移幅が 5 倍程度に広がり、鈍っていることがわかる。転移が鈍ると温度計感度 α が下がり、X 線パルスの波高値が小さくなってエネルギー分解能は悪くなる。

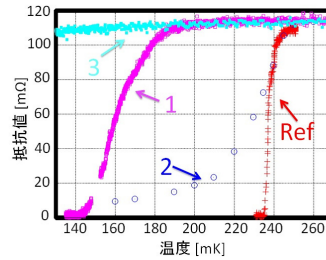


図 8: 磁気シールド組み合わせごとの TES の抵抗-温度特性

図 8 には、センサ周りの磁気シールドの組み合わせを変えて測定を行った結果も一緒に示してある(プロット 2, 3)。プロット 2 はセンサ周りに磁気シールドを被せないときの結果である。抵抗が小さい領域で転移が鈍っており、TES の超伝導部分の割合が増加するにつれて外部磁場の影響を受けやすくなっているのではないかと考えられる。プロット 3 では磁気シールドとして超伝導体 (Nb) のみ使用した場合の結果である。この時はそもそも転移が見られず、何も被せない場合よりも磁場環境が悪いことを示唆している。これは、ADR リサイクル時に超伝導マグネットが最大磁場を印加した際 (~ 3 T) に超伝導シールドが磁場をトラップしているためではないかと考えられる。

そこで、超伝導マグネット周りの磁気シールドの設計を見直し、厚みを増やして最大磁場をかけた状態でも飽和しないようにした。新しいシールドを設置した様子を図 9 に示す。

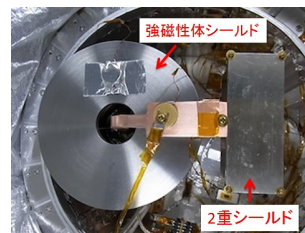


図 9: 新しいマグネットシールドを設置した様子

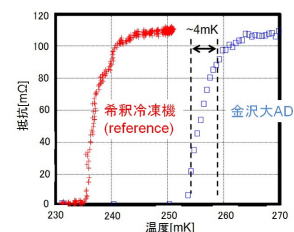


図 10: 新しいマグネットシールドでの TES の抵抗-温度特性

新しいシールドを用いた磁場環境で再度抵抗-温度特性を測定したところ、図 10 に示すように TES の転移幅は 4 mK まで改善され、希釈冷凍機と同程度の結果が得られるようになった。

4 X 線パルス検出

改善された環境の下で X 線パルスの検出実験を行った。検出器ステージの写真を図 11 に示す。カロリメータ素子の上にコリメータと ^{55}Fe 線源を取り付けている。素子には希釈冷凍機で $\Delta E = 5.1 \text{ eV}$ の性能が確認されているものを使用した。

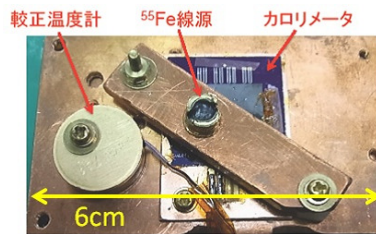


図 11: X 線パルス検出実験セットアップ

取得した X 線パルスの波形の一例を図 12 に示す。遷移端が改善されたことにより、波高値は大きく、時定数は短くなった。図 13 は波高値のヒストグラムである。5.9 keV の Mn $K\alpha$ 線のピーク

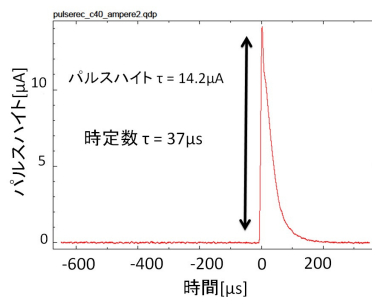


図 12: パルスレコードの一例

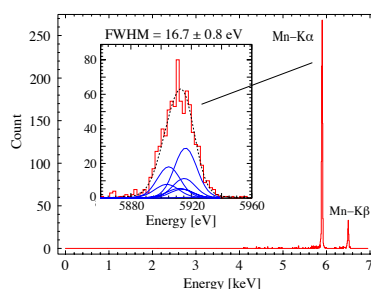


図 13: 波高値のヒストグラムと、Mn $K\alpha$ 線のピークに微細構造のモデル (青線) を当てはめた結果。横軸はエネルギーに変換してある。

クに微細構造を考慮したモデルをフィットした結果、半値全幅として $16.7 \pm 0.8 \text{ eV}$ ($E/\Delta E \sim 350$) という値が得られた。磁気環境が改善されたことにより、エネルギー分解能も 90 eV から大きく改善したといえる。しかしながら、まだ素子本来の性能が実現できていないとはいえない。その一因として、TES の周囲にまだ残留磁場があり、その影響を受けている可能性を考えている。そこで、現在はセンサ周りの磁気シールドの見直しに取り組んでいる。

5 まとめと今後

断熱消磁冷凍機内の磁性体カプセルの改良を行い、最低到達温度 40 mK 以下、80 mK 以下で 20 時間以上保持するという性能を確認した。十分な冷却性能を持ち、安定に動作する磁性体カプセルを製作する方法が確立できたといえる。

これまでセンサの性能 (エネルギー分解能) が悪かった主要な原因が、最大磁場を発生させている時の超伝導マグネットの漏れ磁場であることを突き止めた。超伝導マグネット周りの磁気シールドを強化することにより、自作 ADR クライオスタット上で希釈冷凍機と同等の急峻な遷移端を実現した。これにより、5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能は 17 eV (FWHM) まで改善した。

今後は、センサ周りの磁気シールドの強化を進め、センサ性能の更なる向上を目指す。

Reference

T.Enoki et al. 2012. J. Low Temp. Phys. 167, 771.
 A.Hoshino et al. 2012. J. Low Temp. Phys. 167, 554.
 K.D.Irwin et al. 1995. IEEE Trans. Appl. Supercond. 5, 2690.
 K.Mitsuda et al. 2012. J. Low Temp. Phys. 167, 795.
 S.H.Moseley, J.C.Mather and D.McCammon. 1984. J. Appl. Phys. 56,1257.
 S.Oishi et al. 2012. J. Low Temp. Phys. 167, 220.
 K.Sakai et al. 2012. J. Low Temp. Phys. 167, 759.
 菱 右京. 2012. 第 42 回天文・天体物理若手夏の学校集録, 観測器 17a.