

平成 2 6 年 5 月 2 1 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340043

研究課題名（和文）宇宙の大規模構造形成を探索する超高分解能X線分光センサと極低温動作環境の開発

研究課題名（英文）Development of a cryogenic high-resolution X-ray spectrometer and its operation environment for exploring formation of large-scale structures in the universe

研究代表者

藤本 龍一（FUJIMOTO, Ryuichi）

金沢大学・数物科学系・准教授

研究者番号：20280555

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 6,800,000 円、（間接経費） 2,040,000 円

研究成果の概要（和文）：銀河団や宇宙の巨大構造の進化の過程を観測的に明らかにするには、精密X線分光により銀河団ガスの運動の様子を測定することが有効である。本研究では、それを可能にする極低温動作のTES型X線マイクロカロリメータを、人工衛星の微小重力下でも使用可能な断熱消磁冷凍機と一体で開発した。その結果、十分な冷却性能を持つ極低温動作環境を実現し、また磁氣的・電氣的シールドを工夫することによって、5.9 keVのX線に対してエネルギー分解能 6.6 ± 0.3 eV（半値全幅）を達成した。

研究成果の概要（英文）：To reveal evolution of clusters of galaxies and large-scale structures in the universe, it is essential to observe motion of hot intracluster medium with high-resolution X-ray spectroscopy. In this research, we developed a cryogenic TES microcalorimeter that could enable such observations, together with an adiabatic demagnetization refrigerator (ADR) that is operative under micro-gravity environment of satellites. The ADR that we developed has enough cooling performance, and we achieved energy resolution of 6.6 ± 0.3 eV (FWHM) at 5.9 keV, after optimizing magnetic and electric shielding.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：X線天文学 精密X線分光 断熱消磁冷凍機 X線マイクロカロリメータ

1. 研究開始当初の背景

銀河団がどのようにして現在のような巨大な系に成長してきたのかは観測的には未解決であり、銀河団ガスの運動の様子（相対速度が数百 km/s）を測定することが有効な方法である。しかしながら、観測対象が広がっているため、回折格子では観測することができず、半導体検出器ではエネルギー分解能が不十分であり、高いエネルギー分解能と撮像能力を併せ持つX線検出器が必要である。このようなセンサとして期待されるのが、超伝導遷移端を超高感度の温度計として利用する TES 型のX線マイクロカロリメータである。

X線マイクロカロリメータ動作には 0.1 K 以下の極低温が必要であり、人工衛星での使用を考えると、微小重力下でも使用可能な断熱消磁冷凍機(ADR)がもっとも現実的である。一方で、超伝導を利用した TES は外部磁場の影響を受けやすく、超伝導マグネットの作る磁場を十分に遮蔽する必要がある。断熱消磁冷凍機の研究は米国が先んじており、日本や欧州でも実験室レベルで基礎研究が始まっている。申請者はこれまでに自作の断熱消磁冷凍機で 90 mK を実現し、断熱消磁冷凍機で極低温環境を実現するためのノウハウを蓄積してきた。

2. 研究の目的

本研究では、断熱消磁冷凍機を使った本格的な TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの性能向上実験の前段階として、その性能を最大限に引き出すことができる極低温環境を極低温環境を、（希釈冷凍機ではなく）人工衛星上で使用可能な断熱消磁冷凍機で実現し、衛星搭載環境に近い環境でのセンサの技術実証を目指す。目標性能は、1) 到達温度 50 mK、温度安定度 1 μ K rms 以下。2) リサイクル時間をなるべく短くして運転効率を高める。3) TES カロリメータと SQUID を動作させ、希釈冷凍機以上のエネルギー分解能を実現する。また、衛星上での使用を念頭に置いて、機械式ではなくガスギャップ式の熱スイッチの採用を目指す。

3. 研究の方法

申請者はこれまでに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の研究開発を進めてきており、これを延長・発展させる形で、まず到達温度と温度安定度を評価し、クライオスタット外部のグラウンディングと配線のシールドリングを最適化することで温度安定度の向上を目指す。

次に、既に希釈冷凍機で評価実績のある TES 型マイクロカロリメータと SQUID を断熱消磁冷凍機の極低温ステージに搭載し、センサとして動作させることを目指す。希釈冷凍機と比較できるようにすることで、冷凍機に起因する性能劣化とセンサ自身に起因する性能劣化を区別する。希釈冷凍機と同じ性

能が実現できない場合、その原因を詳しく調べて改良方法を検討する。ここでもクライオスタット外部のグラウンディングと配線のシールドリングによってセンサの性能が大きく変わることが予想されるので、これらにも注意を払いながら性能を改善する。

リサイクル時間の短縮については、断熱消磁冷凍機の磁性体カプセルの熱伝導度を改善するように設計を見直し、製作、評価を行なう。新しく製作した磁性体カプセルを使って断熱消磁冷凍機として動作させ、さらに SQUID と TES カロリメータを組み込んで X 線センサとして動作させて性能を評価する。センサの分光性能に問題が生じる場合は、クライオスタットの断熱構造を見直し、放射の回り込みを徹底的に抑制する。

最終的には要求性能を満たす冷却系としての断熱消磁冷凍機を完成させる。これによりセンサ評価環境を手にすることができ、センサの評価と設計への反映を繰り返して、さらなるセンサ性能の向上を図る。

4. 研究成果

(1) 磁性体カプセルと冷却性能

本研究期間中に、磁性体カプセルの設計・製作を 2 度実施した。1 回目は冷却性能の改善を目指してカプセルを大型化し、カプセルの材質をそれまでのガラスエポキシからステンレスに変更した。その結果、自作断熱消磁冷凍機上で 50 mK まで冷却できるようになり、保持時間も大幅に延びた。しかしながらリサイクル時間についてはあまり改善が見られず、またカプセルの密封が不十分で結晶が漏れるという不具合が発生した。

2 回目は、大きさは同じで、励磁時の排熱時間を改善するために結晶内に這わせる金線の本数を倍に増やし、結晶漏れを防ぐためにカプセルの継ぎ目を溶接にするといった改良を施した。その結果、無負荷時の最低到達温度は 40 mK 以下となり、また 100 mK 以下の保持時間は 20 時間以上になった。同時に、結晶漏れを起こすことなく繰り返し使用できるようになった。センサ動作に十分な冷却性能を持つものを再現性よく製作する方法を確立できたといえる。

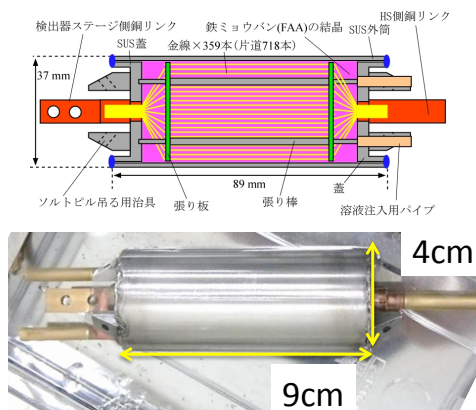


図 1: 製作した磁性体カプセルとその断面模式図

ただし、排熱時間に関しては予想に反して改善が見られず、結晶内の熱伝導度が主要な要因ではないということが明確になった。検討の結果、ケースに用いているステンレスの熱容量が大きいことが原因ではないかと考えている。

(2) 磁気遮蔽の改善

初年度に自作断熱消磁冷凍機上で TES 型 X 線マイクロカロリメータと SQUID を動作させ、X 線信号を検出することに成功した。しかしながら 5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能は 90 eV にとどまり、目標性能よりも 1 桁悪い値であった。その原因を追求した結果、TES の超伝導転移の際の転移温度幅が 20 mK 程度と、本来の値よりも数倍広がっており、磁場の影響が示唆された。さらに詳しく調べた結果、超伝導磁石で最大磁場をかけた際に、漏れ磁場によってセンサの周りの超伝導体の磁気シールドが磁場をトラップしてしまい、センサ動作時の性能に影響を与えていると結論するに至った。

そこで、超伝導磁石の周りの磁気シールドの設計を見直し、励磁した際にも一定の遮蔽効果が得られるようにした。これにより、転移温度幅は希釈冷凍機での測定と同等の 4 mK にまで改善し、5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能も約 16 eV まで改善した。

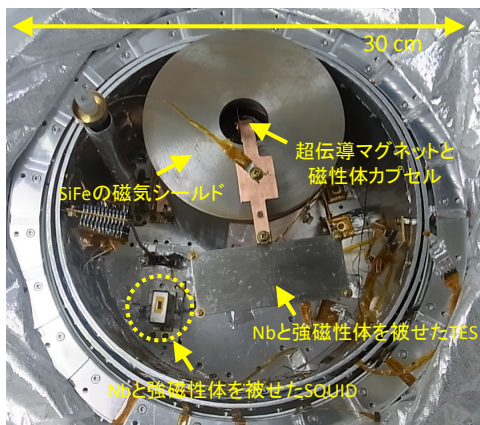
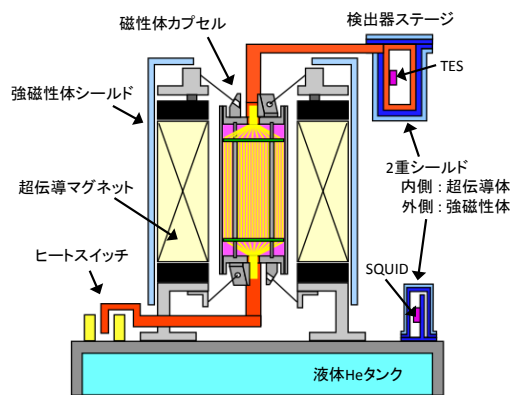


図 2: (上) クライオスタット断面模式図。(下) 新しい超伝導マグネット用シールドを取り付けた様子。

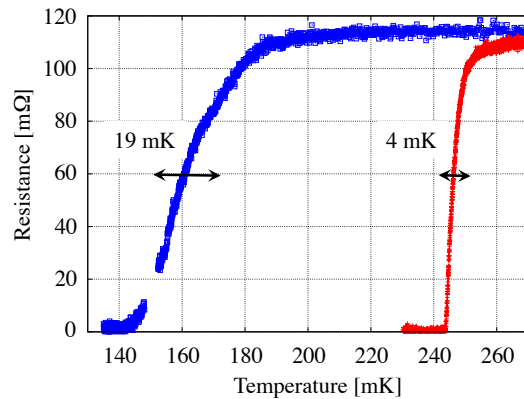


図 3: 磁気シールド改修による TES の抵抗温度特性の改善。青が改修前、赤が改修後。

(3) センサ分光性能の改善

磁気遮蔽の改善に加えて、さらなるセンサ分光性能の改善に取り組んだ。主な改善点は以下の通りである。まず EMC 対策として、クライオスタットと駆動装置・計測装置のグラウンディング、それらをつなぐハーネスのシールドングの方法とその施行を一から見直した。これにより、読み出し系のノイズスペクトルにおいて特定の周波数をもった成分が抑制され、ノイズの RMS 値も半分程度に抑えられた。ファラデーケージにすることで外部からのノイズを遮断すると同時に、配線間のクロストークが抑えられたことで改善したと考えられる。

また、センサの周りの磁気シールドについて、超伝導体と強磁性体の組合せの順番を変更して性能がどのように変わるかを調べた。その結果、内側を超伝導体、外側を強磁性体にする方が、若干性能がよくなる傾向が見られた。

以上のような改善を積み重ねることによって、最終的に 5.9 keV の X 線に対して 6.6 ± 0.3 eV のエネルギー分解能（半値全幅）を実現することができた。使用した素子は希釈冷凍機での測定で 5.6 eV のエネルギー分解能を持つことがわかっており、まだ若干改善の余地は残されているものの、自作断熱消磁冷凍機上で TES 型 X 線マイクロカロリメータを動作させてほぼ希釈冷凍機に匹敵する分光性能を実現できた。

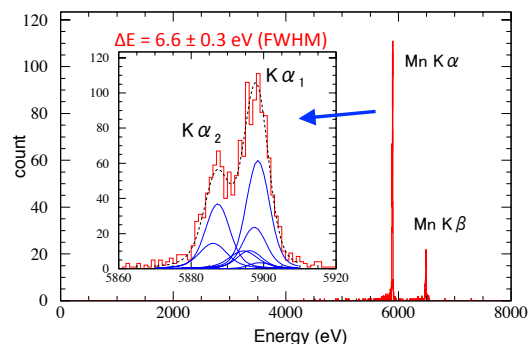


図 4: 最終的に得られた ^{55}Fe 線源(Mn K α 線)のスペクトル。

(4) ガスギャップ式熱スイッチ

ガスギャップ式熱スイッチについては試作機の基本特性の評価を行ない、構造部材についてほぼ計算通りのオフ熱伝導度の実現できていることを確かめた。

本研究で培った断熱消磁冷凍機と磁気シールドの技術は、人工衛星に TES 型 X 線マイクロカロリメータを搭載して銀河団や宇宙の大規模構造の観測を行なうために欠かせないものであり、本研究の大きな成果である。本研究で達成できた半値幅は $E/\Delta E \sim 900$ に達し、少なくとも国内で稼働中の断熱消磁冷凍機の中ではもっとも優れた性能である。この性能は素子自身の性能で制限されていることから、潜在的にはさらに優れた性能を実現できている可能性がある。本研究の最終目標である宇宙の大規模構造の精密 X 線分光観測の実現を目指して、今後さらなる動作環境の改善を進めるとともに、センサ評価環境として活用してセンサそのものの性能改善に取り組む。また、本装置を精密 X 線分光システムとして、実験室（地上実験）への応用も考えていく。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- (1) U. Hishi, R. Fujimoto, T. Kuniyoshi, S. Takakura, T. Mitsude, K. Kamiya, M. Kotake, A. Hoshino, K. Shinozaki, Magnetic Shielding of an Adiabatic Demagnetization Refrigerator for TES Microcalorimeter Operation, J. Low Temp. Phys. Online First (2014) 7 pages, DOI:10.1007/s10909-013-1005-4, 査読有
- (2) A. Hoshino, T. Yatsu, T. Kuniyoshi, N. Koi, M. Notsuke, R. Fujimoto, R. Yamamoto, K. Shinozaki, Development of Adiabatic Demagnetization Refrigerator for X-ray Microcalorimeter Operation, J. Low Temp. Phys. 167 (2012) 554-560, DOI:10.1007/s10909-012-0592-9, 査読有

〔学会発表〕（計 8 件）

- (1) 菱右京, 断熱消磁冷凍機を用いた X 線マイクロカロリメータ動作環境の開発, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 19-22 日, 国際基督教大学, 東京都三鷹市
- (2) 菱右京, 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の開発, 第 14 回宇宙科学シンポジウム, 2014 年 1 月 9-10 日, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市

- (3) U. Hishi, Development of Compact Adiabatic Demagnetization Refrigerator for X-ray Microcalorimeter Operation, 15th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2014 年 6 月 24-28 日, Pasadena, California, USA
- (4) 菱右京, 断熱消磁冷凍機を用いた X 線マイクロカロリメータ動作環境の構築(3), 日本天文学会 2013 年春季年会, 埼玉大学, 埼玉県さいたま市
- (5) 菱右京, 断熱消磁冷凍機を用いた X 線マイクロカロリメータ動作環境の構築, 第 13 回高エネルギー宇宙物理連絡会研究会, 2013 年 3 月 4-6 日, 石川県文芸会館, 石川県金沢市
- (6) R. Fujimoto, Design and performance demonstration of the cooling system for the Soft X-ray Spectrometer onboard Astro-H, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2012, 2012 年 7 月 1-6 日, Amsterdam, The Netherlands
- (7) 國久哲平, 断熱消磁冷凍機を用いた X 線マイクロカロリメータ動作環境の構築(2), 日本天文学会 2012 年秋季年会, 2012 年 9 月 19-21 日, 大分大学, 大分県大分市
- (8) 谷津貴裕, 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, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 21 日, 鹿児島大学, 鹿児島県鹿児島市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 龍一 (FUJIMOTO, Ryuichi)
金沢大学・数物科学系・准教授
研究者番号：20280555

(3) 連携研究者

江副 祐一郎 (EZOE, Yuichiro)
首都大学東京・理工学研究科・准教授
研究者番号：90462663