

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

金沢大学 自然科学研究科 数物科学専攻
宇宙物理学研究室 修士1年 谷津貴裕

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。またX線帯域には酸素、マグネシウム、珪素、硫黄、鉄など主要元素のK輝線が存在している。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、元素組成、元素量を調べることができ、そして宇宙における物質の3次元マップを作成し、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。そのために次世代X線天文衛星への搭載を目指し、超伝導遷移端を利用したTES(Transition Edge Sensor)型マイクロカロリメータの開発をISAS/JAXA、首都大学東京とともに進めている。

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測定する検出器である。

0.1K以下の極低温で動作させることで $E/\Delta E > 1000$ の分解能を実現し、2014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。また温度計として、先に述べたTESを使用することでさらなる分解能の向上が可能となる。0.1Kという極低温環境を作り出すためには断熱消磁冷凍機が必要である。ADRは冷媒である磁性体に対し、印加磁場を制御しエントロピー操作を行うことで極低温を実現する。また、重力依存性がないことから宇宙空間で使用可能であり、衛星搭載用の冷凍機として用いられている。金沢大学は昨年度よりカロリメータ動作のための断熱消磁冷凍機を開発を行っている。

昨年度の状況として、ADR用のクライオスタットを用意し、磁性体カプセルの自作を行った。ADR用クライオスタットは寒剤として液体Heを使用したもので、内部にその蒸気を利用して冷却する2層の放射シールドがあり、それぞれ70Kと180Kまで温度が下がる。その内側には液体Heタンク(4K)と熱接触した放射シールドがあり、磁性体に磁場を印加する超伝導マグネットは液体Heタンクに直付けされている。また、クライオスタットの高温部から液体Heタンクへの放射対策として、多層断熱材(MLI: Multi Layer Insulation)を装着した。MLIはアルミ蒸着フィルムとポリエステルネットを交互に10~20重ねて使用し、 n 枚重ねることで放射を $1/n$ にすることが出来る。これにより熱流入が低減されて液体Heの保持時間は装着前の2倍の約48時間となった。自作した磁性体カプセルは磁性体として鉄ミョウバン結晶を使用したもので、ケースにはガラスエポキシを用いている。また結晶間の熱伝導を良くするためにケース内に金線が張られ、金線はケースに取り付けられた銅

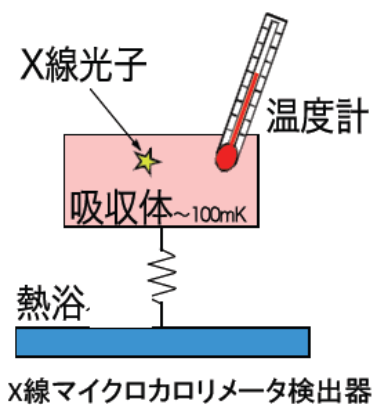


図1: X線マイクロカロリメータの模式図

ブロックと接続されている。

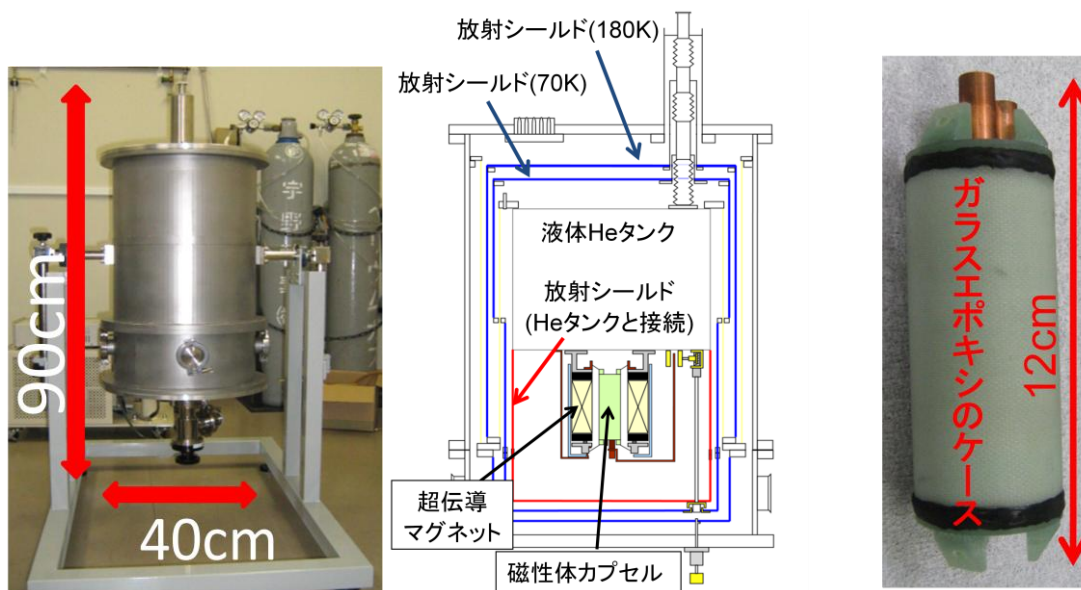


図 2 : クライオスタット外観

図 3 : クライオスタット構造

図 4 : 磁性体カプセル

これらを用いて断熱消磁を行ったところ到達温度は 190mK、200mK 以下での保持時間は 1 時間程度であった。また断熱消磁後に熱スイッチを OFF のまま温度上昇を見ると、磁性体カプセルの温度は 15K 以上にも上昇した。周りには 4K のシールドがあるはずなので、高温部からの放射熱が漏れ込んでいることが到達温度を制限している原因であると分かった (流入熱 $10 \mu W$)。

今年度はまず放射対策を徹底する必要があると考え、以下のような対策を講じた。

- ・配線が通っている穴に少し隙間があったのでアルミテープを貼り、穴を完全に塞ぐようにした。
- ・熱スイッチを動かすための稼動部分の穴の隙間を極力小さくした。
- ・MLI を追加して高温部からの放射をさらに遮断するようにした。

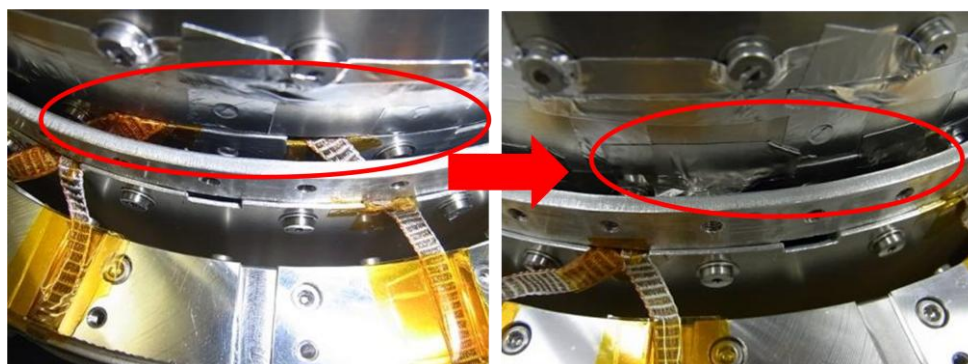


図 5 : 配線の穴にアルミテープを貼る

これらの放射対策後に断熱消磁を行ったところ、最低到達温度は 90 mK を達成した。そして 100mK 以下で約 7 時間保持することが可能となった。また最低温度に到達後、温度制御試験を行った。温度制御とは外部からの流入熱に応じて消磁を行ない、カロリメータを動作温度で一定に保つことである。設定温度 100mK で温度制御をかけると制御時の温度ゆらぎは、 $1\sigma = 16\mu\text{K}$ となり、これは $10\mu\text{K}$ rms 以下という目標に近い温度安定を達成できたと言える。最低温度が 90mK まで達し、100mK 以下で 7 時間保持できるようになり、昨年度までよりも ADR の性能は格段に向上したが、まだ改善すべき点はある。その一つとして、マグネット電流をきってから最低到達温度に達するまで 2.5 時間かかるということが挙げられる。この原因として考えられるのは磁性体カプセルの熱伝導が悪いということである。具体的には金線と結晶の間、金線と銅ブロックの接続部分の熱伝導が悪いと考えられ、これを改善するために我々は熱伝導の良い新しい磁性体カプセルの製作を進めている。金線と結晶の間については金線の本数を増やすことで、金線とブロックの接続についてはハンダ付けを銀ロウ付けにすることで熱伝導度の改善が見込まれる。現在は金線を張り終えたところで、これから結晶を充填し、出来上がり次第性能評価をする予定である。今後は放射対策のさらなる強化を行うとともに新しい磁性体カプセルの製作を進め、今年度中に X 線カロリメータの動作、そして X 線の検出を目指す。

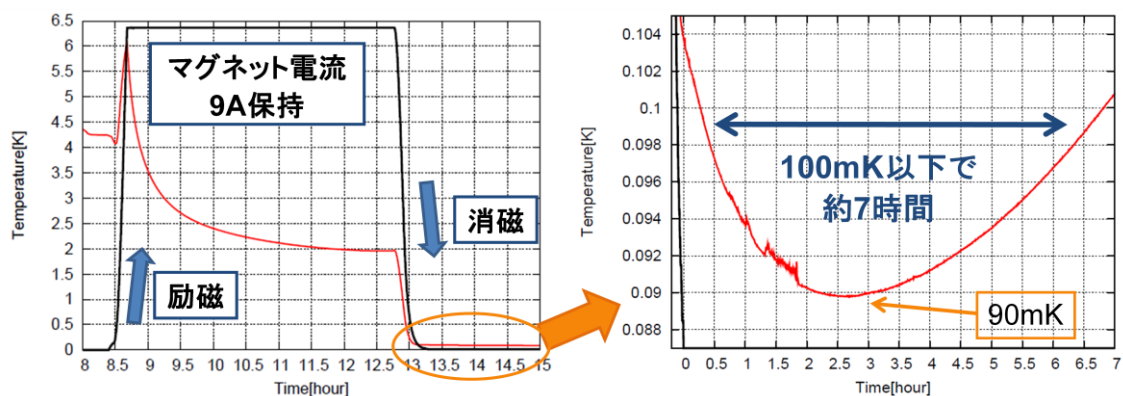


図 6：放射対策後の断熱消磁試験の結果