

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動作と 性能向上を目指した研究

金沢大学大学院 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
菱右京

平成24年8月30日

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。0.1K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($E/\Delta E \sim 1000$)を実現し、精密な分光観測が可能となる。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。そこで我々は、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の開発を進めている。

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事で、X線の検出を行う。より高いエネルギー分解能を実現するには、0.1K以下の極低温動作環境と、感度の良い温度計が必要となる。

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(ADR)を用いる。断熱消磁冷凍機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冷凍機である。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。

温度計には超伝導遷移端の温度変化に対する急激な抵抗変化を利用した、TES(Transition Edge Sensor)を用いている。また、TESの読み出しには高感度の電流計である超伝導量子干渉計(SQUID)を用いている。これは、ジョセフソン効果を利用し磁束の変化を電圧として読み出す電流計で、磁束量子程度の微小な磁束変化も検出する事ができる。

TESは超伝導遷移端を利用した温度計である為、磁場に対して非常に敏感である。対して冷却を行う断熱消磁冷凍機は、非常に強い磁場を発生させる。この2つを同時に使用する事を可能にする為、我々のグループでは断熱消磁冷凍機を用いた冷却動作環境とセンサの開発を一体で進めている。金沢大学は昨年度より、断熱消磁冷凍機の開発を進め、最低到達温度0.04K、温度安定度 $\sigma = 9\mu\text{K}$ 、0.08K以下での保持時間が15時間以上と低温環境を実現し、X線マイクロカロリメータの動作環境を構築した。

昨年夏以降、TESの遷移端測定、SQUIDの動作確認を順次進めていき、X線マイクロカロリメータ

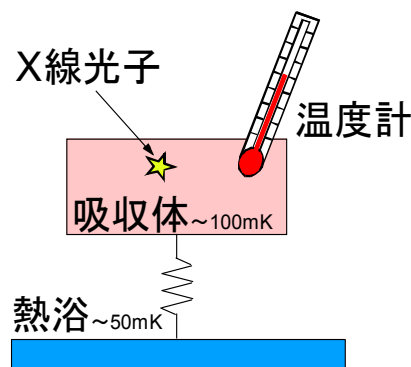


図1: X線マイクロカロリメータの模式図

としての動作環境を整えていった。そして、 ^{55}Fe 線源とコリメータを取り付けて 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。エネルギー分解能は 5.9keV の X 線に対して 90eV であった。半導体検出器の 120eV 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。

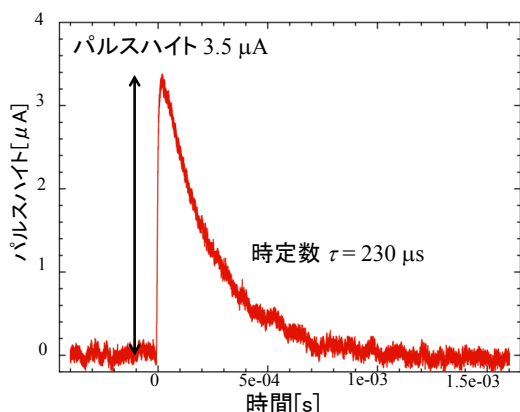


図 2: パルスレコードの一例

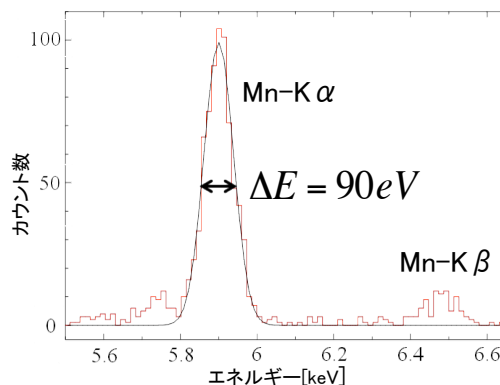


図 3: 1015 パルス集めて得られたエネルギースペクトル (5.9keV の X 線に対して、エネルギー分解能 90eV)

エネルギー分解能を制限している原因として、ノイズが大きいという事と信号が小さいという事が挙げられる。ノイズの原因は特定できてはいないが、信号が小さい事に関しては TES の抵抗-温度特性の評価を行ったところ、遷移端が過去に首都大学東京の希釈冷凍機 (冷却に磁場を用いていない冷凍機) での測定に比べて鈍っている (転移幅が $\sim 1/5$) と分かった。これは、磁場の影響により温度計の感度 α が悪くなっていると考えられる。

そこで、現在 TES の抵抗-温度特性が磁気シールドの違いによってどのように変化するか調べている。通常は、TES がある検出器ステージの周りを超伝導体である Nb (内側) と強磁性体 (外側) の 2 重シールドで覆っている。図 4 に示した 2 重シールドでの TES の抵抗-温度特性を見ると、希釈冷凍機 (首都大学東京) での測定に比べ転移幅が大きく十分に満足できる効果を得られていない。そこで超伝導体 (Nb) 単体でどの程度のシールド効果が得られるのかを調べた。すると超伝導体 (Nb) のみでは転移温度が下がり、抵抗-温度特性もさらに鈍っている (図 4 の赤のプロット)、または転移していない (図 4 の緑のプロット)。この結果より、少なくとも我々の持つ超伝導体の磁気シールドのみでは不十分であることが分かった。

今後、高透磁率材のみでの抵抗-温度特性の評価などを行い、さらに詳細なシールドの効果を調べていく。また、それらの結果をもとに磁気シールドの強化を行い、改善された環境でのパルス検出を行う予定である。

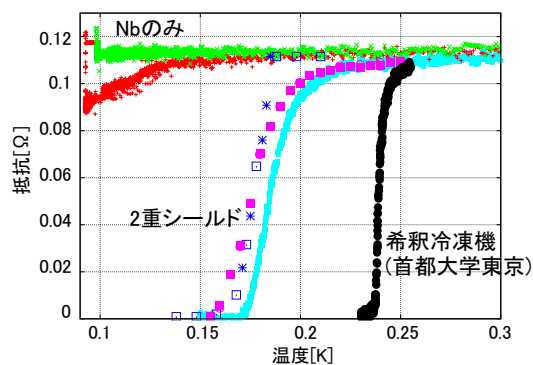


図 4: 磁気シールドの違いによる抵抗-温度特性 (磁気シールドを 2 重シールドにしての測定でのプロットの違いは測定方法の違いによるもの)