

小型衛星を目指した多素子X線マイクロカロリメータの 開発

Development of multi-pixel microcalorimeters aiming for
small scientific satellites

大橋 隆哉 (OHASHI TAKAYA)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授



研究の概要

現在の宇宙で未検出のまま残されている温度数 100 万度の銀河間物質をとらえるとともに、宇宙の様々な階層の大規模高温ガスのダイナミクスを解明するために、小型科学衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を実現させる。このために数 100 ピクセルからなる TES 型 X 線カロリメータおよび読み出し系を開発し、小型衛星としてのシステム設計も行う。

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：小型科学衛星、マイクロカロリメータ、X線分光観測、銀河間物質

1. 研究開始当初の背景

(1) X線分光天文学の進展：極低温で動作するX線マイクロカロリメータにより分光性能が数 10 倍向上する見通しが開けた。日本は 2014 年に ASTRO-H でカロリメータによる宇宙 X 線観測を実現するが、これをさらに進展させることで多くの成果が期待される。
(2) 宇宙に存在する通常物質(バリオン)の半分以上が未検出であり、このダークバリオンは広視野の X 線分光観測のみによって全貌をとらえることが可能である。この解明により宇宙の構造進化、熱的進化の理解が大きく進むと期待される。

2. 研究の目的

(1) 数 100 ピクセルからなる TES 型 X 線マイクロカロリメータを開発し、ダークバリオンの探査を目指す小型科学衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) の検出器システムのプロトタイプを開発する。
(2) TES カロリメータの信号読み出し系、冷却系を開発し、熱的、電力的に小型衛星として実現可能なシステムを構築する。

3. 研究の方法

(1) TES カロリメータの開発：首都大、宇宙研グループの自作により、256-400 ピクセルの TES カロリメータを製作し、試験を行う。
(2) システムとしての開発と検討：TES と並行して読み出し系、冷却系、衛星システム設

計等を含め、小型衛星としての可能性を実証する。

4. これまでの成果

(1) 多素子の TES カロリメータの開発：本グループでは単素子の TES カロリメータで 2009 年に 2.8 eV という世界記録に迫るエネルギー分可能を出し、256 素子の TES アレイでも、X 線吸収体が無い状態ではあるが 4.4 eV という性能を実現している。さらに、配線の密集度を下げクロストークを低減するために、基板の厚さ方向に絶縁層をはさんで配線を 2 段重ねた積層配線という新たな技術により、TES カロリメータアレイの開発を進めた。この方法では、まず配線を形成し、その上へ TES を作り込む必要がある。当初の製作では、超伝導転移において、残留抵抗値が要求値を超えて大きく、臨界電流も低すぎるという問題が見られた。これに対処するために、Al 表面の酸化膜を除去するため、TES 形成の前に逆スパッタを行うこととした。さらに、Ti-Au 二層薄膜が段切れになるのを防ぐため、二層薄膜の厚さを約 2 倍に高めた。こうして積層配線上に改良型の TES 素子を製作したところ、転移温度、残留抵抗、臨界電流ともほぼ要求値を満たすものを作ることができ、それをもとに 400 素子からなる TES カロリメータを製作し、その試験を実施中である。
TES アレイでは各ピクセルの上にマッシュルーム型の X 線吸収体をつける必要がある。

この吸収体を安定に保持できるよう新たな設計のもとに開発を進めた。10 ピクセルからなる試験モデルが製作され、X線照射試験が進められている。

TES の冷却系では 2 段式断熱消磁冷凍機 (ADR) を自作した他、新たに小型で性能の良いヒートスイッチの開発も行った。

(2) 信号読み出し系の開発

熱入力を極力減らすために、TES の信号読み出しをマルチプレクスすることが必須である。本研究では TES を交流駆動とし、その周波数をピクセルごとに変えて加算し、1 ラインで読み出した後に復調するという新たな方式を採用している。この読み出しでは TES の駆動バイアスが MHz オーダーとなり、配線長等により信号遅れが無視できない。我々は駆動バイアスについてベースバンドフィードバックという方法で駆動信号の位相を調整することにより、安定した SQUID (超伝導量子干渉素子) 駆動ができることを確認した。読み出しに用いる SQUID としては衛星搭載を考え、低発熱多入力の SQUID を製作、実際の測定を行った。4 入力 SQUID の試作まで進んでいる。SQUID についても所定の動作ができること、またノイズレベルについても実測定を行ない、同時駆動の場合でも問題ないことを確認した。

(3) 小型科学衛星へ向けた検討

小型科学衛星としての熱的、機械的、電気的な成立性を検討した。条件として ASTRO-H 搭載と同等の機械式冷凍機 (2 段スターリングおよび JT 冷凍機)、3 段の ADR を用い、液体は He 無し、衛星軌道は 500 km、衛星バスとの熱的なインターフェースを仮定した。X線入射部のフィルターは 4 K, inner shield, outer shield, outer shell の 4 つのシールドに固定し、冷凍機やドライバーの発熱は放熱板から宇宙に逃がすことにした。この結果、熱的には成立するものの冷却系の消費電力が 277 W となり、ペイロードの許容電力 300 W のほとんどを必要とすることになった。このままでは信号処理系の電力が賄えないため、バス系の電力も合わせて検討を進めている。具体的には、バス系から DIOS で必要としない機能を削減し電力を浮かせる、放熱板を 2 枚設け、宇宙方向を向いた放熱板だけをループ式ヒートパイプで切り替えて使い排熱効果を高めるなどの方法を検討している。

(4) 国際協力

本グループは ASTRO-H のカロリメータシステムを国際協力で開発するとともに、TES カロリメータを主体とする将来の X 線ミッションを共同提案してきた実績を持つ。DIOS 計画へ向けて、米、オランダ、イタリアの研究者と議論を行い、国際協力の役割分担等の検討を進めている。

5. 今後の計画

(1) TES カロリメータアレイの開発: 400 素子の TES カロリメータに X 線吸収体をつけることが課題である。H24 年度に吸収体付き TES アレイの製作と試験をおこない、H25 年度には性能改良を図る。

(2) 信号読み出し系の開発: H24 年度前半に 4 ch の信号多重化を行い、エネルギー分解能の劣化なしに、何素子まで多重化が可能か目処をつけ、H25 年度には読み出し系を完成させる。

(3) 小型科学衛星としての検討: H24 年度に衛星バスを含めた電力の見直しをつける。年度末までに衛星の提案を行い、H25 年度は衛星としての最適設計を進める。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

“Development of Superconducting Multilayer Wiring for Large Arrays of TES X-ray Microcalorimeters”
S.Oishi, Y.Ishisaki, Y.Ezoe, Y.Abe, Y.Enokijima, R.Hosoya, T.Ohashi, K.Mitsuda, T.Morooka, K.Tanaka
Journal of Low Temperature Physics, 167, 220-225 (2012)

“Development of Active Gas-Gap Heat Switch for Double-Stage Adiabatic Demagnetization Refrigerators”
Y. Ishisaki, K. Henmi, H. Akamatsu, T. Enoki, T. Ohashi, A. Hoshino, K. Shinozaki, H. Matsuo, N. Okada, T. Oshima, Journal of Low Temperature Physics, 283 (2012)
DOI 10.1007/s10909-012-0594-7

“Studying the Warm-hot Intergalactic Medium in Emission”
Y. Takei et al., Astrophys. J., 734, 91 (2011)
“Future X-ray Missions for High Resolution Spectroscopy”
T. Ohashi, Space Science Reviews, 157, 25 (2010)

“DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor: status and prospects”
T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, et al. SPIE, 77321S (2010)

江副祐一郎, 篠崎慶亮, 竹井洋

解説 “進化する X 線マイクロカロリメータ - 精密 X 線分光で解き明かす宇宙の大規模構造 -”
物理学会誌 実験技術, 日本物理学会, 2009 年 8 月号

ホームページ等

<http://www-x.phys.se.tmu.ac.jp/dios/>