

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21224003

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Development of multi-pixel microcalorimeters aiming for small scientific satellites

研究代表者

大橋 隆哉 (Ohashi, Takaya)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：70183027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 90,000,000 円、(間接経費) 27,000,000 円

研究成果の概要(和文)：宇宙で未検出のダークバリオンすなわち中高温銀河間物質(WHIM)を、赤方偏移した酸素の輝線スペクトルで検出する小型の X 線天文衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を目指して、装置開発や衛星へ向けた検討を行った。TES カロリメータは基盤の厚さ方向へ配線を重ねる積層配線技術を実用化し 400 素子製作への目処をつけ、ベースバンドフィードバックによる多重読み出しや独自設計の低発熱 SQUID を開発し、機械式冷凍機や新型熱スイッチの性能確認、DIOS 衛星の熱・機械設計を行うなど、DIOS 衛星の実現性を確認し、小型衛星の提案へ向けた技術基盤を確立した。

研究成果の概要(英文)：More than half of baryons in the local Universe are unidentified and they are likely to distribute as warm-hot intergalactic medium (WHIM) with low density and about 1 million K. High-resolution X-ray spectroscopy of redshifted lines is the only method to detect WHIM and we aim for a study from a small satellite called DIOS. We have developed 400 pixel TES microcalorimeters with a technique of multilayer wiring method in which wirings run in layers of Si substrate separated by insulation layers. TES bilayers showed good superconducting transition properties. Readout method of TES calorimeter arrays using frequency domain multiplexing and base-band feedback techniques have been developed. Mechanical coolers are developed as engineering models for ASTRO-H and they can be used for DIOS. We also performed thermal and mechanical design of the payload and confirmed that all the system can be accommodated in the small satellite. International collaboration scheme was also discussed.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：宇宙物理 X 線天文学 人工衛星 銀河間物質 超伝導材料・素子

1. 研究開始当初の背景

陽子や中性子などの通常物質であるバリオンは、宇宙全体のエネルギー密度の 4.5%ほどであるが、天体や元素を構成するバリオンの存在形態の全貌を知ることは重要である。近傍宇宙のバリオンの探索が進められ、中高温の銀河間物質 (WHIM)として一部が検出されてきたが、まだ大部分が未検出でダークバリオンとして残されている。日本は 2015 年打ち上げの ASTRO-H に搭載するマイクロカロリメータ (SXS)で X 線分光感度を大幅に高めるが、より多素子へ改良することによりダークバリオンの多くが検出可能になると期待されている。本研究はカロリメータ技術や冷凍技術を一層発展させ、ダークバリオンを解明する小型衛星 DIOS として実現させるために計画された。

2. 研究の目的

本研究の目的は小型衛星 DIOS へ向けてマイクロカロリメータを中心とする技術開発を進め、衛星としての実施が可能であることを実験室レベルで実証し、研究期間終了後早期に衛星計画へ提案できるまで開発・検討を進めることにある。具体的には、エネルギー分解能数 eV で数 100 素子からなる TES カロリメータアレイの製作技術の確立、多素子からの信号読み出し系の開発、小型衛星に搭載可能な無冷媒の冷却系の開発、熱モデル、機械モデル等にもとづいた小型衛星システムとしての成立性の確認と概念設計、そして ASTRO-H SXS での国際協力をもとに、DIOS の TES カロリメータシステムの共同製作の体制を作ることが目的である。

3. 研究の方法

本研究は、研究代表者の所属する首都大グループと研究分担者の所属する JAXA 宇宙研との緊密な協力のもとに実施され、合わせて約 10 名の大学院生が参加するとともに、メーカーの協力も得ながら進めた。TES カロリメータの製作に関しては、Si 基板へ積層配線を作

り込む部分をメーカーや産業技術総合研究所に依頼し、最後に 2 層薄膜を製作して TES カロリメータに加工する作業は、首都大と宇宙研の装置を用いて本研究グループ自身で行った。読み出し系の開発は本グループが回路設計を行い基板の製作を外注するなどして進めた。冷却系開発は自作による断熱消磁冷凍機を整備する一方 ASTRO-H 用の機械式冷凍機エンジニアリングモデルの性能評価を行うという両面で進め、衛星システムの検討は小型科学衛星や ASTRO-H の経験を持つメーカーと協議することで進めた。

4. 研究成果

(1) TES カロリメータアレイの開発 : DIOS に搭載を予定する TES カロリメータは、焦点距離 70 cm の 4 回反射望遠鏡で 50 分角の空を見込むために、1 cm 四角の大きさが必要である。さらにこれを 3 分角で分解するために 16×16 (256)または 20×20 (400)素子のアレイが要求される。高い集積度に対して読み出し用の配線スペースを得るために、本研究では積層配線、すなわち 1 素子への入力と出力の配線を基板の厚さ方向に重ねる方式を開発した。これによって配線間のスペースに余裕が生まれ、1 素子への往復ラインが接近するためクロストークも減らせる。図 1 に 400 素

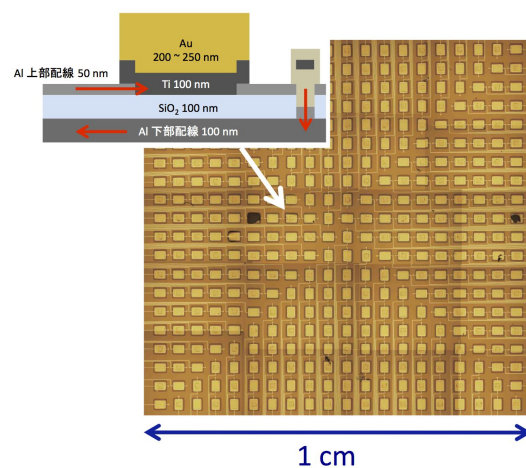


図 1: 本研究で開発された 400 素子の TES カロリメータアレイと、1 素子が積層配線でつながる様子の断面図。

子 TES カロリメータと積層配線の構造を示す。実際の製作手順としては、まず Si 基板上に積層配線を作り込み、その後で TES の 2 層薄膜をスパッタでつけることになる。メーカーの協力により積層配線を製作したところ、配線の端が 50 nm ほどの高さの段差となった。この上に Ti-Au 2 層薄膜 (50~100 nm 厚) をスパッタで製作したところ、段差のために薄膜が段切れを生じ、超伝導転移温度が 250 mK ほどと高く、残留抵抗も 20 m Ω となり良い特性を得られないことがわかった。TES の段切れを回避するため産総研グループの協力を得て、配線の端面を斜めに削り込む加工を行うことにした。斜面の上に 2 層薄膜をスパッタすることで、50 nm ほどの厚さでも段切れを生じないと考えられる。これを実証するために、上部配線だけをつけた基板に傾斜加工を施し、Ti-Au の厚さ 40/90 nm の 2 層薄膜を製作した。この結果、超伝導転移温度は 170 mK、残留抵抗も 0.3 m Ω と良好な特性が得られた。これによって、400 素子の TES カロリメータアレイを製作する技術基盤をほぼ確立することができた。また、TES の放射線による劣化を、150 MeV 陽子を 10 krad (軌道上の約 10 年分) 照射して調べ、エネルギー分解能の有意な低下はないことを確認した。これらの成果は SPIE, LTD など国際学会で発表するとともに集録論文などとして出版されている。

(2) 冷却系の開発: DIOS の冷却系は機械式冷凍機 (スターリング冷凍機とジュールトムソン冷凍機) と 3 段の断熱消磁冷凍機 (ADR) という、ASTRO-H の冷却系から液体ヘリウムを除いたものを考える。ADR は NASA との共同製作を考えるが、本グループとしても自作の 2 段式 ADR の開発、特に新設計の熱スイッチの開発を進めた。到達温度は 200 mK とやや高いが、ソルトピルの調整、磁気シールドの設計などを進め、ADR としての実用化へ近づけることができた。機械式冷凍機は

ASTRO-H 搭載機のエンジニアリングモデルを改修し DIOS へ使うことを検討している。2013 年には ASTRO-H の試験として機械式冷凍機をデュワーに組み込んだ冷却試験が行われ、微小振動がカロリメータに与える影響を改善する必要があるが、このシステムで 4 K 程度までの冷却は十分可能で、改修の後 DIOS へ使用できることが確認された。一方、TES カロリメータを収めた真空断熱容器 (デュワー) への X 線入射部は直径 6 cm にもなり、フィルターの強度が問題になるが、試作モデルを振動試験するなどして一定の見通しを得た。

(3) 読み出し系の開発: 本研究では TES のアナログベースバンドフィードバック回路の開発を進めた。この回路は周波数分割方式によって、複数の TES からの信号をひとつの読み出し配線で受けた後に復調し、パルス波形を得ると同時に、低温においた超伝導量子干渉素子 (SQUID) 増幅回路にフィードバックを戻し、動作させるものである。配線による位相遅れを保証することで、極低温下の TES + SQUID を室温の回路で駆動することができる。位相検波器を用いた回路系を製作し、4 素子の TES とフィルターを極低温下で実装し、原理実証を行った。問題点としては、1 つの TES に信号が入射したとき、他のピク

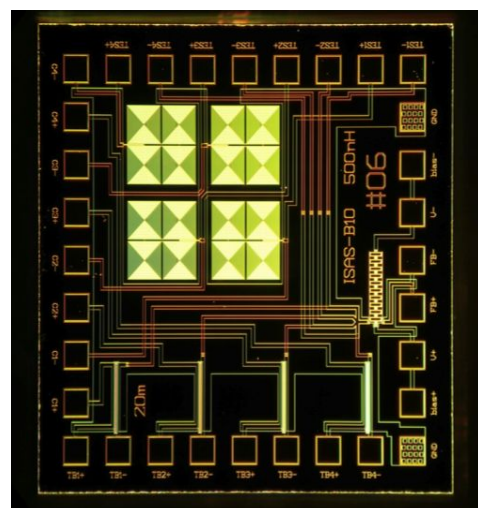


図 2: 本研究で製作された低発熱の超伝導量子干渉素子 (SQUID)。

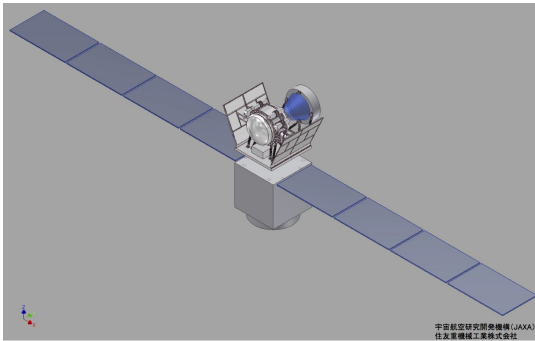


図 3: DIOS 衛星の外観。太陽電池パドルの全長は約 10 m、衛星重量は約 600 kg で、2020 年頃の打ち上げを目指す。

セルにも微弱な信号が生じる（クロストーク）ことがあった。その原因を追求し、周期的な応答を示す SQUID をフィードバックにより線形化して用いているが、残存する非線形性がクロストークを作っていることを突き止めた。フィードバック回路の高周波でのオープンループゲインが不足しているために、線形化が不十分だったと考えられる。この試験に基づき、正しい動作に必要な回路のゲインや SQUID の特性について、再度洗い出しを行った。平行して、ADC+FPGA を用いたデジタル式のベースバンドフィードバック回路の設計を行い、前置増幅器やフィードバック回路のゲインの最適化も図った。図 2 には独自に設計・製作された低発熱の SQUID を示す。この結果 8 ch であれば、所定の性能が期待できるという結果が得られた。これらの結果については国際学会 LTD などでは発表、査読付き論文として出版した。

(4) 衛星システムの検討：小型科学衛星の各種条件をもとに、熱的機械的な概念設計を行い、DIOS ミッションとしての成立性を確かめた。まず機械式冷凍機の冷凍能力について熱モデルを製作して検討したところ、熱的には成立するが冷凍機だけで電力が 280 W 必要であることがわかった。これに信号処理等を加えるとペイロードの電力は 400 W 近くになる。これを供給するために太陽電池パドルを片側 4 枚とする方向で設計を進める。また X 線望遠鏡と真空断熱デューワー、電子回路など

について概念設計を行った。図 3 に DIOS 衛星の外観を示す。ベースプレートに回路をマウントし、そこからトラスで支える形でデューワーと望遠鏡を配置した。構造解析を行ったところ、固有振動数は要求を満たすことがわかった。また衛星バスとペイロードの間の熱的なインターフェースも検討した。ペイロード重量は 280 kg 程度となるが、衛星バスを合わせてもイプシロンロケットの打ち上げ能力の範囲には収められる見通しとなった。

(5) 国際協力の推進：米 NASA ゴダード宇宙飛行センターのグループは ASTRO-H SXS の検出器、アナログ処理回路、ADR などを開発しており、TES カロリメータでも優れた成果をあげている。DIOS の TES へも米国のノウハウをできる限り取り込むために、米責任者の R. Kelley らと数回の打ち合わせを行い、米グループも独自の予算を得る努力をして、今後 DIOS の共同製作を進めるという基本合意が得られた。

(6) コミュニティからの評価：2012 年秋に高エネルギー宇宙物理学連絡会の評価委員会が組織され、小型衛星などへ X 線グループから提案されていた 6 計画の審査が行われ、DIOS は PolariS (X 線偏光観測計画) とともに最高の S 評価を得た。その後、日本学術会議天文学・宇宙物理学分科会から推薦された 8 つの計画の中に DIOS が唯一の X 線天文計画として含まれ、2014 年 3 月には日本学術会議が公表した学術の大型研究計画に関するマスタープランに、唯一の X 線天文計画として DIOS が採択された。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

Takei, Y.; Ursino, E.; Branchini, E.; Ohashi, T.; Kawahara, H.; Mitsuda, K.; Piro, L.; Corsi, A.; Amati, L.; den Herder, J. W.; Galeazzi, M.; Kaastra, J.; Moscardini, L.; Nicastro, F.; Paerels, F.; Roncarelli, M.; Viel, M.: Studying the Warm-hot Intergalactic Medium in Emission, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Volume 734, article id. 91, pp.18, 2011,

DOI:10.1088/0004-637X/734/2/91

Ezoe, Yuichiro; Ishisaki, Yoshitaka; Oishi, Shihoko; Abe, Yuki; Ohashi, Takaya; Yoshitake, Hiroshi; Sekiya, Norio; Mitsuda, Kazuhisa; Morooka, Toshimitsu; Tanaka, Keiichi: Development of Multilayer Readout Wiring for Large-Format TES X-Ray Microcalorimeter Arrays, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 21, issue 3, 2011, pp. 246-249, DOI:10.1109/TASC.2010.2081962

I. Mitsuishi, A. Gupta, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, T. Ohashi, K. Sato, M. Galeazzi, J. P. Henry, R. L. Kelley: Search for X-Ray Emission Associated with the Shapley Supercluster with Suzaku, PASJ, 査読有, 64, Article No.18, 14 pp.

DOI: 10.1093/pasj/64.1.18

T. Ohashi, H. Akamatsu, H. Kawahara, N. Sekiya, Y. Takei: X-ray study of clusters at the outer edge and beyond, Astronomische Nachrichten, 査読有 334, 2013, pp.325-328 DOI: 10.1002/asna.201211850

K. Ichikara et al.: Suzaku Observations of the Outskirts of A1835: Deviation from Hydrostatic Equilibrium, ApJ, 査読有 766, 2013, pp.90:1-19

DOI: 10.1088/0004-637X/766/2/90

Y. Shimoda et al.: Metals in the Intracluster Medium of MS 1512.4+3647 Observed with Suzaku: Implications for the Metal Enrichment History, PASJ, 査読有, 65, 2013, pp. 111:1-13 DOI: 10.1093/pasj/65.5.111

S. Yamada et al.: Development of Multilayer Readout Wiring TES Calorimeter for Future X-ray Missions, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 20, 2014, pp.1-6 DOI: 10.1007/s10909-013-1056-6

Y. Ishisaki et al., Radiation Tolerance Evaluation of the Ti/Au Bilayer TES Microcalorimeter, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 21, 2014, pp.1-4 DOI: 10.1007/s10909-013-1058-4

R. Yamamoto, K. Sakai, Y. Takei, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda: Performance of Frequency Division Multiplexing Readout System for AC-biased Transition-Edge Sensor X-ray Microcalorimeters, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 2014, DOI:10.1007/s10909-014-1128-2

K. Sakai, Y. Takei, R. Yamamoto, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, M. Hidaka, S. Nagasawa, S. Kohjiro, T. Miyazaki: Baseband Feedback Frequency-Division Multiplexing with Low-Power dc-SQUIDs and Digital Electronics for TES X-Ray Microcalorimeters, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 2014, DOI:10.1007/s10909-013-1040-1

〔学会発表〕(計 5 件)

T. Ohashi: Search for WHIM in X-rays (Invited), The X-ray Universe 2011, 2011年6月27-30日, Berlin, Germany

Ohashi, T., Ishisaki, Y., Ezoe, Y., Tawara, Y., Mitsuda, K., Yamasaki, N. Y., Takei, Y.: Status of the Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (DIOS), SPIE Conference 8443, 2012年7月1-6日, Amsterdam, The Netherlands

T. Ohashi: The near vision (next 10 years) of X-ray astronomy in Japan (Invited), 13th HEAD AAS Meeting, 2013年4月7-11日, Monterey, USA

T. Ohashi et al.: DIOS: the dark baryon exploring mission, Suzaku-MAXI 2014, 2014年2月19-22日, 愛媛大学

大橋隆哉ほか: ダークバリオン探査ミッションDIOS開発の進展現状, 日本天文学会春季年会 2014年3月19-22日, 国際基督教大学

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1)研究代表者

大橋 隆哉 (OHASHI, Takaya)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 70183027

(2)研究分担者

石崎 欣尚 (ISHISAKI, Yoshitaka)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 10285091

山崎 典子 (YAMASAKI, Noriko)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙物理学研究系・准教授
研究者番号: 20254146

江副 祐一郎 (EZOE, Yuichiro)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 90462663

(3)連携研究者

満田 和久 (MITUDA, Kazuhisa)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙物理学研究系・教授
研究者番号: 80183961