

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分  
平成29年3月21日現在

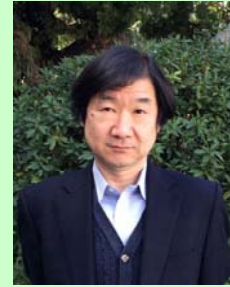
広視野X線分光観測による宇宙大規模プラズマの研究

Study of large-scale cosmic plasmas by wide-field X-ray spectroscopy observations

課題番号：26220703

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

ダークバリオンのX線探査を目指す小型衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) の実現へ向けて、衛星検討と観測装置の技術開発を行い、「ひとみ」冷却系の正常動作などの成果を得た。X線代替機の実施による計画変更を踏まえ、角分解能を約10秒角とするなど、性能を大きく増強させた Super DIOS を2030年ごろに実現させるために開発を進める。

研究分野：数物系科学、天文学、天文

キーワード：X線γ線天文学

1. 研究開始当初の背景

現在の宇宙では、陽子や中性子からなる通常物質（バリオン）の半分以上が未検出で残されていて、ダークバリオンと呼ばれている。これらは温度が約100万度で低密度の銀河間物質として宇宙の大構造に沿って分布すると考えられるが、観測的にほとんど未解明の状態にある。その理由は、ダークバリオンが出すX線の表面輝度が低いため、我々の銀河系内の軟X線拡散放射に隠されてしまうためである。このダークバリオンの放射を捉えるほぼ唯一の方法が、電離酸素などが出す赤方偏移した輝線スペクトルを高いエネルギー分解能で検出することである。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、宇宙に広く分布するダークバリオンをX線放射や吸収線によってとらえ、宇宙の大規模構造の進化や、バリオン（陽子や中性子からなる通常物質の総称）の熱的・化学的進化の過程を明らかにすることである。この目的のために小型衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を本グループの主導により開発し、できるだけ早期の打ち上げを目指す。搭載される観測装置は TES カロリメータアレイ、無冷媒冷却系、4回反射望遠鏡であり、2 keV 以下の視野×面積（広がった放射に対する感度）は「ひとみ」衛星の100倍以上、2028年にヨーロッパ中心に計画する大型X線天文台 Athena に匹敵する能力となる。

3. 研究の方法

首都大、名古屋大、JAXA 宇宙研が中心となり、DIOS 衛星の設計を進めるとともに観測系の開発を進める。また国際協力の実績がある米国 NASA ゴダード宇宙飛行センターのグループとも協力しながら、衛星提案へ向けた準備を進める。TES カロリメータについては、首都大グループが産総研などと協力しつつカロリメータ素子の製作を進め、宇宙研グループが読み出しシステムを主に担当する。冷却系は「ひとみ」の機械式冷凍機と断熱消磁冷凍機を同一設計で DIOS に用いるため、「ひとみ」の開発と試験、軌道上運用に最大限の力を注ぐ。4回反射X線望遠鏡は名古屋大グループが開発し、宇宙研の協力も得ながら試験を行う。研究組織には合わせて約10名の大学院学生が本研究に参加しており、開発の成果を論文や学会などで発表していく。

4. これまでの成果

・「ひとみ」衛星の冷却系とマイクロカロリメータの性能実証：

衛星打ち上げ後1ヶ月強の間に冷却系は安定に動作し、SXS 検出器（マイクロカロリメータ）も5 eV を切るエネルギー分解能を軌道上で実現した。ペルセウス座銀河団から高分解能のエネルギースペクトルを捉え、ガスの乱流運動や重元素の存在量をこれまでに比べて桁違いに高い精度で測定し、X線精密分光が期待通りのサイエンス成果を生み出すものであることを実証した。

#### ・DIOS 衛星の検討:

衛星としての概念設計や熱設計が行われ、本研究で開発しつつある衛星が、実際にイプシロンロケットに適合する重量 800 kg ほどまでの小型衛星として、実現可能であることが示された。特に機械式冷凍機は 380 W の電力を必要とするものの、小型衛星の枠内で電力的にも熱的にも成立することが確認された。

#### ・高速姿勢制御の検討:

遠方宇宙で発生するガンマ線バーストを背景光とし、途中の銀河間物質による吸収線を観測するため、ガンマ線バースト発生後 2-3 分のうちにそちらへ向ける高速姿勢制御を検討した。ハードウェア的には高速制御が可能ではあるが、バースト位置を衛星に伝えるための通信系が今後の課題となった。

#### ・4 回反射望遠鏡の開発:

3 分角という角分解能を達成できるかが技術課題である。薄板ガラスと精密加工円錐金型を組合わせたマンドレルによるレプリカ円錐鏡面の製作に成功し、直径 240 mm の quadrant 4 段反射鏡を組み込んだ望遠鏡に対して、可視光および X 線ビームテストを行い、角分解能約 5 分(Half Power Diameter)という性能を確認した。目標 3 分角へはあと一歩であるが、実現性は十分高いことが示された。

#### ・TES カロリメータの開発:

素子数を 400 またはそれ以上とし、ダークバリオンの空間構造を 3 分角ほどの精度で捉えることを目指した。TES カロリメータの素子製作では積層配線という新たな技術に挑戦し、小さな基板の中に立体的に配線を作りこむことで、TES 素子の集積度を大幅に上げる可能性に道を開いた。

#### ・読み出し系の開発:

64 素子の配線を室温回路と接続し、並列に読み出すシステムを作った (図 10)。周波数空間で変調するという独自の信号多重化を押し進め、16 チャンネルまで多重化できる見通しを得た。

#### ・コミュニティからの評価:

日本学術会議が出す、学術の大型計画に関するマスタープランに 2015 年と 2017 年の 2 回採択された。また高エネルギー宇宙物理学連絡会からも、「ひとみ」に続く重要な計画として支持されている。

以上の通り DIOS の開発へ向けて多くの成果が得られたが、「ひとみ」衛星が 2016 年の打ち上げ後、約 1 ヶ月で姿勢異常となり観測を断念するに至った。X 線代替機を 2021 年に打ち上げる計画が始まったため、DIOS は性能を強化した上で、打ち上げ時期を遅らせて (2030 年ごろ)、引き続き検討を進める。

#### 5. 今後の計画

X 線代替機 (2021 年打ち上げ)、ヨーロッパ主導の大型計画 Athena (2028 年)への参加のために、DIOS を増強した Super DIOS は 2030 年ごろの打ち上げを考える。主な変更点は、角度分解能を約 10 秒角へと 20 倍ほどへ向上させ、点源を自前で取り除くことを可能とする。これによりダークバリオンの検出感度と信頼性は大幅に高まる。このために角度分解能をあげた X 線光学系、それに対応した画素数の多い TES カロリメータの開発が必要である。X 線光学系はヨーロッパで実績のあるレプリカ方式をベースに引き続き名古屋大学で検討を進める。TES カロリメータは 3 万素子が開発目標ではあるが、世界的にはマイクロ波読み出しなど開発が始まっている。本グループも GHz 読み出しの検討に着手しており、残る期間で実現性の高い方式を検討する。並行して Super DIOS の衛星検討を進め、衛星の概念設計や打ち上げ方式を期間内に明確にさせ、具体的な衛星提案へ近づける。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

Hitomi Collaboration [218 名, Y. Ezoe (28 番目), Y. Ishisaki (62 番目), K. Mitsuda (111 番目), T. Ohashi (134 番目), Y. Takei (174 番目), Y. Tawara (182 番目), S. Yamada (206 番目), N. Y. Yamasaki (209 番目)]: Hitomi constraints on the 3.5 keV line in the Perseus galaxy cluster, *ApJ*, 837, L15 (2017)

Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Yamada, S.; Kuromaru, G.; Suzuki, S.; Tawara, Y.; Mitsuishi, I.; Babazaki, Y.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Takei, Y.; Yamamoto, R.; Hayashi, T.; Ota, N.; Kelley, R. L.; Sakai, K.: DIOS: the dark baryon exploring mission, *SPIE*, Volume 9905, id. 99051N 10 pp. (2016)

Yamasaki, N. Y.; Sekiya, N.; Kikuchi, T.; Hoshino, M.; Mitsuda, K.; Sato, K.: Dielectric Resonators as Radiation Detectors at Low Temperatures, *Journal of Low Temperature Physics*, Volume 181, Issue 1-2, pp. 59-67 (2015)

Tawara, Yuzuru; Sakurai, Ikuya; Sugita, Satoshi; Takizawa, Shunya; Babazaki, Yasunori; Nakamichi, Ren; Bandai, Ayako; Maeda, Yoshitomo; Hayashi, Takayuki: Development of the Four-stage X-ray telescope (FXT) for the DIOS mission, *SPIE*, Volume 9144, id. 914461 6 pp. (2014)

ホームページ等

[http://www-x.phys.se.tmu.ac.jp/home/wp/?page\\_id=106](http://www-x.phys.se.tmu.ac.jp/home/wp/?page_id=106)