

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220703

研究課題名(和文) 広視野X線分光観測による宇宙大規模プラズマの研究

研究課題名(英文) Study of large-scale cosmic plasmas by wide-field X-ray spectroscopy observations

研究代表者

大橋 隆哉 (OHASHI, Takaya)

首都大学東京・理学研究科・特任教授

研究者番号：70183027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 155,130,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の大規模構造に沿って広がると考えられる未検出物質、ダークバリオン の直接観測を行うX線天文衛星の実現を目指した技術開発を進めた。世界初のマイクロカロリメータを搭載した衛星ASTRO-Hにより、ペルセウス座銀河団の高温ガスの乱流をはじめ検出するなどの成果を得た。さらに将来の衛星に向けて、TESカロリメータの高い集積度を可能にする製作技術に目処をつけたほか、オランダSRONのTESアレイと組み合わせることで、GHz帯での40画素同時多重化読み出しによりエネルギー分解能3.3 eVを得た。軽量のX線望遠鏡の開発では、要素素子についてサブナノの表面粗さと15秒角程度の角度分解能の成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、高精度のX線分光の技術的基盤を確立することに貢献したことが挙げられる。宇宙ではASTRO-H衛星の成果を得たが、原子核物理(K中間子原子の測定)、惑星科学(小惑星サンプルのX線分析)などへの応用実験も広がりつつあり、本研究の波及効果は大きい。社会的意義としてはこの技術が広く実用化された時に、高精度のX線分析などをもとに産業応用を広げていくことが期待される。

研究成果の概要(英文)：High resolution X-ray spectroscopy has been developed, with the aim of directly observing warm-hot plasma, likely to distribute along the large-scale structure of the universe, with a future X-ray astronomy satellite called DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor). Development of microcalorimeter, cooling system and X-ray telescope was advanced. The first microcalorimeter system was flown on the X-ray astronomy satellite ASTRO-H (Hitomi) in 2016. The instrument detected the turbulence of hot gas in the Perseus cluster, and gave a clear feature of the resonance scattering effect in this cluster. Furthermore, development of the TES calorimeter and lightweight telescope for a future mission such as Super DIOS has been carried out. With array type TES calorimeters, provided by SRON, our GHz multiplex reading of 40 pixels resulted an energy resolution of 3.3 eV. The development of lightweight X-ray telescope achieved an angular resolution of about 15 arcsecond for a single reflection.

研究分野：X線天文学、宇宙物理学、科学衛星を用いた宇宙X線観測と観測機器の開発

キーワード：銀河間物質 銀河団 X線分光 マイクロカロリメータ X線望遠鏡

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙の大規模構造は 1980 年代に銀河サーベイから確認され、コールドダークマターが構造形成を支配していることの証拠となり、2019 年にノーベル物理学賞を受賞した Peebles はその研究に大きく貢献した。一方、宇宙を構成する要素は、大きくダークエネルギー (69%)、ダークマター (26%)、通常物質バリオン (5%) に分けられるが、現在の宇宙ではバリオンの半分以上が未確認となっており、宇宙の大規模構造に沿って温度 100 万度ほどの低密度のガスとして広く分布することが、構造形成の理論的シミュレーションなどから予想された (図 1: 中高温銀河間物質 WHIM と呼ばれる)。ダークバリオンの放射を捉える上では、我々の銀河系を満たす 100-300 万度の高温プラズマの放射が数 10 倍も強いいため、X線の連続放射を使うことができない。ほぼ唯一の方法が、ダークバリオンの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。ダークバリオンの放射を直接検出することができれば、宇宙の大規模構造が、赤方偏移 0.3 ほどから現在に到るまでどのように形成されて来たのかを明確に知ることができる。またダークバリオンの温度や化学組成からは、銀河形成に伴う超新星活動、巨大ブラックホールの関係する銀河アウトフローなど、宇宙の進化の鍵を握る情報が多く得られると期待される。一方、ダークバリオンの X線放射を明確に検出するには、エネルギー分解能が 5 eV を上回り、広がった放射を高感度で捉えられる装置が必要となる。それを実現する極低温で動作する検出器 X線マイクロカロリメータの開発が日米欧の協力により進展し、世界ではじめて日本の ASTRO-H (「ひとみ」) 衛星に搭載され、X線観測が実現されようとしていた。これを支える冷却系の技術も、赤外線天文衛星などへの応用をステップに、日本を中心に発展してきた。X線望遠鏡は多重薄板望遠鏡という日本の誇る技術が「あすか」、「すざく」、ASTRO-H といった衛星で搭載実績をあげてきていた。以上の通り、宇宙物理学的意義においても、X線観測技術の発展においても、ダークバリオン探査は時宜を得た重要テーマとして認識されるに至った。

2. 研究の目的

本研究は、世界ではじめて X線マイクロカロリメータ を搭載する ASTRO-H 衛星計画を推進するとともに、ダークバリオンの広域観測を実現するために、約 1 度という広視野で分光能力を 2 eV 程度と大幅に増強した小型衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor: 図 2) を開発し、2020 年ごろに打ち上げることを目的として計画された。観測装置は TES カロリメータアレイ、無冷媒冷却系、4 回反射望遠鏡からなり、2 keV 以下での視野×面積 (広がった放射への感度) は 2030 年代に ESA を中心に計画される大型 X線天文台 Athena に匹敵する。DIOS が実現する広視野の高分解能分光観測によって、ダークバリオンの探査に加えて、地球近傍から銀河団まで、宇宙に存在するさまざまな大規模プラズマの物理的性質やダイナミクスを一挙に解明することを目指すものである。具体的な研究目的は、以下のように分けられる。

- 1) ASTRO-H 衛星の実施: X線マイクロメータを搭載するほか、この衛星に搭載される機械式冷凍機はそのまま DIOS へ応用できることから、ASTRO-H を支援し X線分光観測による科学成果を得ることは、本研究の重要な目的の 1 つである。
- 2) DIOS 衛星の開発: JAXA がイプシロンロケットで進める小型科学衛星の 1 つとして DIOS を提案するとともに、衛星検討と搭載機器の開発を進める。TES (Transition Edge Sensor) カロリメータは、ASTRO-H タイプを発展させたもので、エネルギー分解能が向上し多素子化が可能となるもので、日米協力により 400-1000 素子のアレイ検出器を開発するとともに、地上実験への応用も行い問題点を明らかにしていく。冷却系 (特に機械式冷凍機) は ASTRO-H 冷却系の無冷媒動作を応用する形で日本が中心となって開発する。X線望遠鏡は多重薄板望遠鏡を 4 回反射とすることで広視野・短焦点距離を実現させ、角分解能 3 分角以下を目指す。

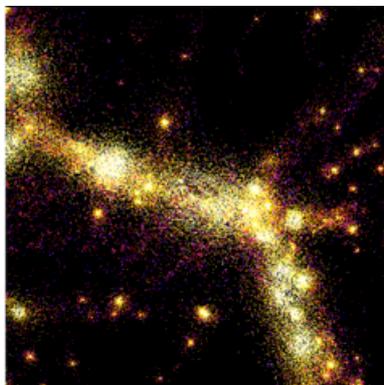


図 1: シミュレーションが予想する、宇宙の大規模構造に沿って分布する中高温銀河間物質。差し渡し 40 Mpc (赤方偏移 0.1 で約 6 度)。

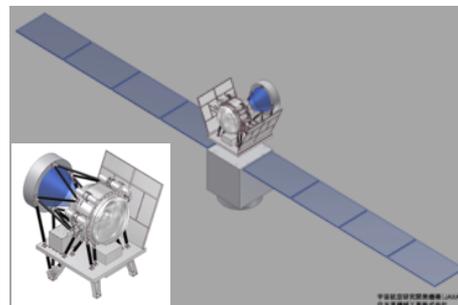


図 2: 本研究で開発する小型衛星 DIOS の予想図。太陽電池パドルの差し渡しは約 10 m、衛星重量は約 700 kg で 2020 年の打ち上げを目指す。左下は観測装置部分の拡大図。

3. 研究の方法

広視野X線分光観測をめざして、世界ではじめてX線マイクロカロリメータと冷却系を搭載したASTRO-H衛星を進めるとともに、DIOS衛星(X線代替機XRISM実施のために、2017年からSuper DIOSへ変更)をできるだけ早い時期に打ち上げるために、首都大、名古屋大、JAXA宇宙研が連携し、米欧の国際協力の実績があるグループとも協力しながら技術開発や地上実験を進めた。研究体制は、大橋隆哉(首都大)が研究代表者、山崎典子(JAXA宇宙研)、田原 譲(名古屋大、2016年度まで)、2017年度から三石郁之(名古屋大)が研究分担者で、それぞれの機関のスタッフや大学院生が研究協力者として加わった。具体的な研究の方法とその状況は以下の通りである。

- 1) **ASTRO-H:** 打ち上げが当初予定より遅れ2016年2月となったが、本研究はX線マイクロカロリメータ検出器(SXS)の試験や、打ち上げ後の約1ヶ月間の軌道上オペレーションやX線観測に取り組んだ。特に本研究代表者・大橋はASTRO-Hのプロジェクトサイエンティストを務め、年2回の国際チーム会議の開催、初期観測天体の選定、打ち上げ後の論文作成のさまざまな調整を主導した。SXSでは、機械式冷凍機の振動を遮断するためのアイソレータを新たに取り付ける、波形処理ロジックの改良により高いカウントレートでのエネルギー分解能を向上させるなど、将来衛星にも役立つさまざまな性能改良が行われた。衛星総合試験を経て2016年2月17日にASTRO-Hは軌道投入され「ひとみ」と命名された。しかし、約1ヶ月後に姿勢系の異常のために衛星としての機能を喪失し、観測を断念することになった。このためASTRO-Hの代替機XRISMを2020年代初頭に打ち上げることとなり、DIOS計画も大きな変更を迫られることになった。一方、ASTRO-Hが銀河団の観測からもたらした科学成果は全く新しいものであり、Nature誌2本を含む約20編の科学論文にまとめられた。
- 2) **DIOS およびハードウェア開発:** DIOSの検出器および望遠鏡の主要部分の開発を本研究で進めた。TESカロリメータと4回反射望遠鏡にわけて研究方法を示す。
TES カロリメータ: 図3に示すような400素子を1cm四角の大きさに配置したTESアレイ検出器の製作を首都大とJAXA宇宙研が中心となって進めた。協力相手の米国を補う技術として、TES素子の基板を多層構造とし、TESを駆動する配線を厚さ方向に重ねる積層配線方式を、産総研の協力も得ながら自作の方式で開発を行った。この方法では、入力・出力電流が厚さ方向に重なって走るため、スペースを圧縮できるだけでなく磁場を介したクロストークも減らすことができる。また、2014年から地上応用としてK中間子原子のX線測定へ向けた共同実験を理化学研究所、米国NISTなどと共同で、また数万素子を読み出す可能性を持つマイクロ波読み出し技術の開発を産総研などと進めた。
X線望遠鏡: 4回反射望遠鏡の開発を、名古屋大中心に進めた。日本で実績のある多重薄板型で3分角の角分解能と視野50分角をめざし、4回反射により外側の反射板の傾き角が大きくなること、反射回数の増加に伴って角分解能が劣化することへの対処を中心に開発を進めた。反射鏡の概念図を図4に示すが、焦点距離は70cm、外径は60cmである。レプリカ用のマンドレルを従来のガラスから金属へ変えて製作し、スムーズな面を得るために薄いガラスシートをつけることとした。望遠鏡を取り付けるハウジングを新たに設計し、そこへ数枚の反射板を取り付け、測定は可視光とX線の両方で行なった。

研究進捗評価(2017年度)について、ASTRO-Hの代替機となるXRISMを急遽実施することにとまない、DIOSを当初予定より5年以上延期せざるを得なくなり、本基盤研究の目的の達成が困難になったことが指摘された。これに対し、国際的にもダークバリオンの探査やX線精密分光を発展させることへの期待が大きく、本研究で開発された技術をXRISM以降のX線分光衛星へ生かすことを含めて、一部縮小した形で研究を続行することが認められた。

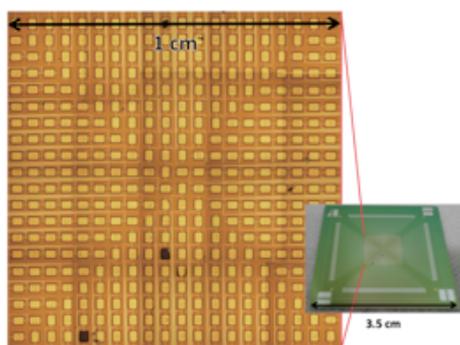


図3: 積層配線技術の開発を進めた400素子のTESカロリメータ。

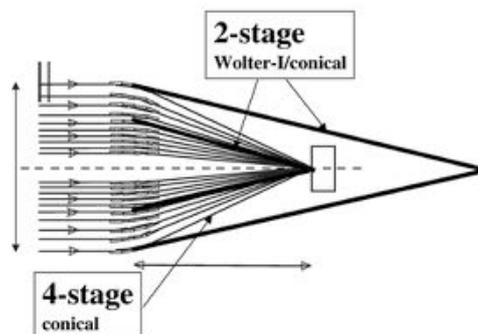


図4: 開発を進めた4回反射X線望遠鏡の概念図。焦点距離を短くでき、小さな検出器で大きな視野を確保できる。

4. 研究成果

研究成果を ASTRO-H SXS の軌道上性能と観測結果、および DIOS (Super-DIOS) へ向けた TES カロリメータと X線望遠鏡の開発の両方について示す。

ASTRO-H SXS:

世界初の X線マイクロカロリメータと冷却系 (図 5) を搭載した ASTRO-H は、2016 年に約 1 ヶ月という短い期間ではあったものの、ペルセウス座銀河団の中心部を観測し、以下のような新しい成果を得た。

SXS システムの動作: SXS 検出器は衛星総合試験の間を通じて、エネルギー分解能が 5 eV(FWHM)を切るよい性能を維持し、打ち上げ後も温度が 50 mK で安定した状態では 4.9 eV を出すことができた。液体 He、断熱消磁冷凍機、機械式冷凍機からなる冷却系も順調に動作し、打ち上げ前後の電源オフ期間を通じて予想の範囲内の温度に保たれた。熱入力は 0.7 mW と低く 3 年以上液体ヘリウムを維持できるレベルであった。こうした冷却系技術は XRISM にも生かされ、将来の Super DIOS へ向けてさらに改良されることになる。衛星搭載の極低温冷却系において日本の技術が世界トップレベルであることも示された。

一方ペルセウス座銀河団の観測は 300 ksec 以上行われ、SXS により図 6 に示すエネルギースペクトルが得られた。主要な結果は以下の通りである。

- 高温ガスの乱流速度を初めて有意にとらえ、視線速度を $110 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$ と決めることができた。乱流のエネルギーは熱エネルギーの約 4% と極めて低いレベルであることもわかった。また、ガスの視線速度が 100 kpc スケールで場所ごとに 100 km s^{-1} ほど変化する、すなわち大局的な速度勾配のあることがわかった。
- He-like な鉄の K 輝線を分解することができ、共鳴線が禁制線などに比べて 10% ほど弱く、共鳴散乱の効果を検出することができた。この結果はペルセウスが銀河団が球対称な構造を持つとする予想と矛盾しないことがわかった。
- XMM-Newton 衛星から、3.5 keV 付近に輝線のような構造があり、ダークマター (ステライルニュートリノ) の消滅線という可能性が指摘された。SXS のデータからはこうした構造が見られず、信頼度 95% で輝線の存在を棄却することができた。
- Cr, Mn, Ni など比較的存在量の低い元素の輝線を明確に検出し、それらがいずれも太陽組成と矛盾しないことを明らかにした。太陽系近傍と銀河団中心部という異なった場所が極めて近い化学組成を持つことは、星形成にも影響を与える結果である。

TES カロリメータの開発:

積層配線による 400 素子の TES カロリメータの自作を進めた。積層配線により集積度を高め、Ti-Au の 2 層薄膜をそれぞれ 60 nm, 40 nm の厚みとし、2019 年度末の時点で、超伝導転移温度約 200 mK, 残留抵抗数 mΩ の良好な素子まで作る事ができた。ただしアレイとして一様な性能を出すこと、X線で安定的な性能を出すところまで及んでおらず、他機関との協力も視野に入れて技術を確立する必要がある。また新たな TES の読み出し手法として、rf-SQUID と超伝導共振回路を用い、GHz 帯での信号多重化を行なう手法の開発を産総研と共同で進めた (図 7)。X線信号速度に対応させるため、広帯域化をすすめ、SRON の TES アレイと組み合わせ、40 画素の同時読み出しを実現した。今回の極低温部への配線数は 8 本であり、従来方式の 240 本から大きな削減をすることができた。38 画素から 3.3 eV (FWHM) の分解能でのエネルギースペクトル取得に成功した。これは ASTRO-H/SXS のマイクロカロリメ

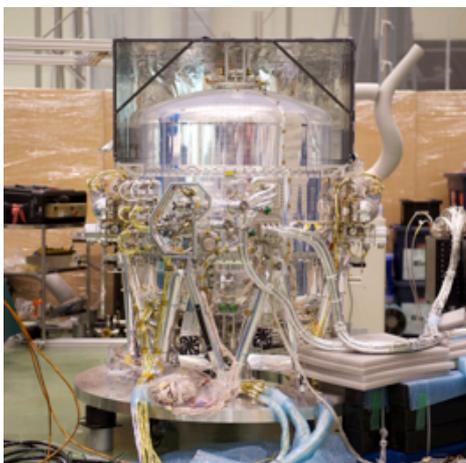


図 5: ASTRO-H SXS の真空断熱容器。マイクロカロリメータ 検出器が中に入り、液体 He、機械式冷凍機で 50 mK に冷却される。

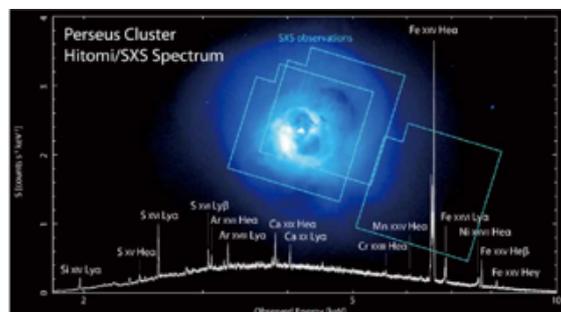


図 6: SXS がペルセウス座銀河団から捉えた X線エネルギースペクトル。チャンドラ衛星による X線像に SXS の視野を重ねて示す。

ータを上回り、またこの方式としても NASA/GSFC による 28 画素読み出しを上回る結果である。また素子の特性に極低温ステージ上の残留磁場の影響が見えており、最適化できた状態とはいえ、読み出し系によるノイズレベルは 1.8eV 相当以下と評価できており、現在開発中の Athena/X-IFU 検出器の要求値にも迫っている。また現在素子数は室温回路の速度、処理能力に律速されており、さらに向上させる余地がある。一方、地上応用として、米国 NIST 製の 240 素子の TES カロリメータを用いた実験を進めた。一つは J-PARC における K 中間子原子の特性 X 線の測定であり、もう一つは Spring-8 における小惑星サンプルなどを対象とした化学組成、構造解析 (XANES) の測定実験である。TES カロリメータは従来のブラッグ結晶に比べ量子効率やダイナミックレンジが高く、全く新しい分光データを得ることができた。本研究は TES カロリメータがもたらす高精度 X 線分光を、X 線天文以外の広い研究分野へ広げていく上で役割を果たすことができたとと言える。

X線望遠鏡の開発:

4 回反射望遠鏡の開発に加え、DIOS 計画を見直しせざるを得ない状況も踏まえて 2018 年度にはより高い角度分解能を目指した Super-DIOS 用の電鍍技術を利用した望遠鏡開発に着手した。電鍍によって、超精密金型のナノレベルの構造を、電気化学反応により金型表面にめっきし、脱型することで超高精度に転写することができる。これにより高い反射面形状精度、ひいては角度分解能が期待できる。また本技術を用いることで、X 線結像に必要な 2 枚の反射鏡を二段一体かつ全周の構造にて反射鏡製作が可能となるため、多数の反射鏡を配置する際に生じる配置誤差を抑えることができることも特長である。まずは金型加工の条件出しについて平板を用いて実施し、切削と磁気流体研磨 MRF を組み合わせることにより、

30 μm スケールでもサブナノメートルの表面粗さを達成した (図 8)。また 2 mm 程度の領域に 1.5 keV の X 線を照射し、角度分解能として 15 秒角程度 (Half Power Width で一回反射) を達成した。また電鍍工程の条件出しをすべく、直径 100 mm の PMMA, NiP 製の金型の製作、および二段一体全周 Ni 製電鍍反射鏡の試作も行った。現時点では周方向の形状誤差が角度分解能を制限しているが、電流密度や温度環境の最適化を図り改善を目指す。

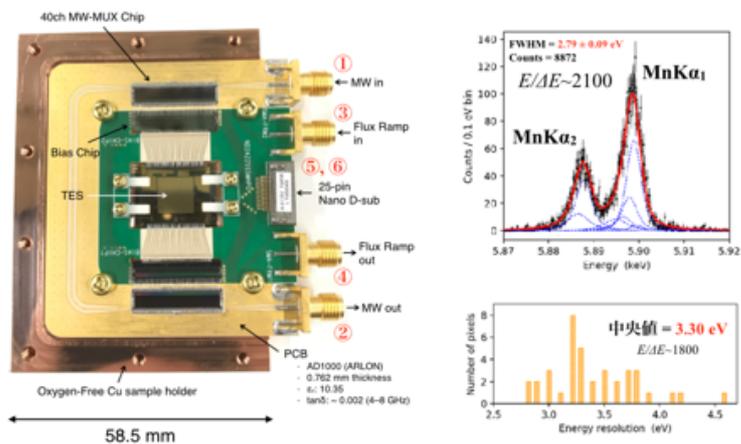
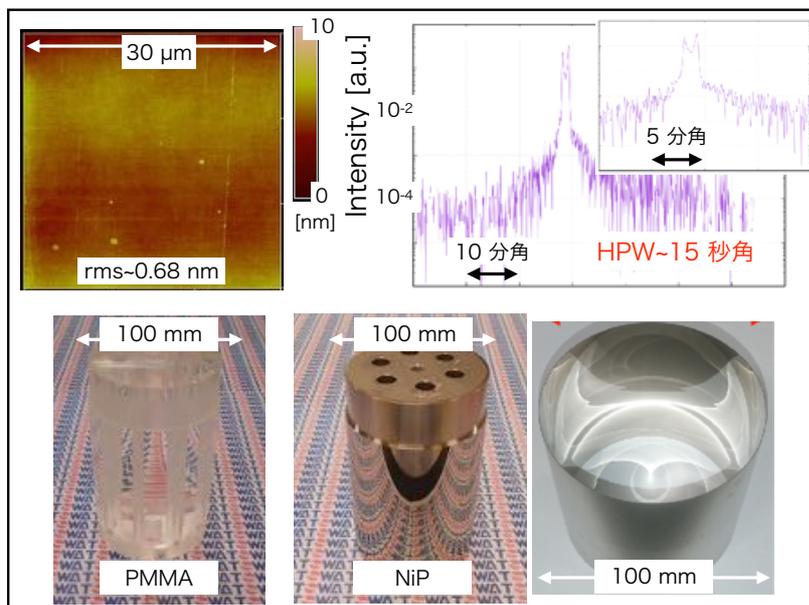


図 7: (左) GHz 共振器による TES マイクロカロリメータアレイ読み出しのセットアップ、(右上) エネルギー分解能のよい Mn K α 1、2 付近のエネルギースペクトルの例 (右下) 38 画素同時取得でえられたエネルギー分解能(FWHM)の分布

図 8: 試作平板の表面形状 (左上) と X 線散乱プロファイル (右上)、および PMMA (左下) / NiP (中央下) 製の金型と二段一体全周 Ni 製反射鏡 (右下)。散乱プロファイル上のダブルピーク構造は基板形状に由来。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakashima Yuki, Hirayama Fuminori, Kohjiro Satoshi, Yamamori Hirotake, Nagasawa Shuichi, Sato Akira, Yamasaki Noriko Y., Mitsuda Kazuhisa	4. 巻 29
2. 論文標題 Investigation of Large Coupling Between TES X-Ray Microcalorimeter and Microwave Multiplexer Based on Microstrip SQUID	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2905688	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamada S., Ohashi T., et al.	4. 巻 193
2. 論文標題 Super DIOS: Future X-ray Spectroscopic Mission to Search for Dark Baryons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1016~1023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s10909-018-1918-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsumoto Hironori, Awaki Hisamitsu, Ishida Manabu, Furuzawa Akihiro, Yamauchi Shigeo, Maeda Yoshitomo, Mitsuishi Ikuyuki, Haba Yoshito, Hayashi Takayuki, Iizuka Ryo	4. 巻 4
2. 論文標題 Inorbit performance of the Hard X-ray Telescope (HXT) on board the Hitomi (ASTRO-H) satellite	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.4.1.011212	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hitomi Collaboration	4. 巻 551
2. 論文標題 Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 478~480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/nature24301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamada S., the DIOS team, Ohashi T., Ishisaki Y., Ezoe Y., Miyazaki N., Kuwabara K., Kuromaru G., Suzuki S., Mitsuda K., Yamasaki N. Y., Takei Y., Sakai K., Nagayoshi K., Yamamoto R., Hayashi T., Muramatsu H., Tawara Y., Mitsuishi I., Babazaki Y., Nakamichi R., Bandai A., Yuasa T., Ota N.	4. 巻 184
2. 論文標題 Future Japanese X-ray TES Calorimeter Satellite: DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 688 ~ 693
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-015-1362-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hitomi Collaboration	4. 巻 535
2. 論文標題 The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 117 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/nature18627	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Y. Nakashima, F. Hirayama, S. Kohjiro, H. Yamamori, S. Nagasawa, A. Sato, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, K. Nagayoshi, H. Akamatsu, J. R. Gao, J. W. den Herder,
2. 発表標題 Microwave Multiplexing Based on SQUIDs Directly Coupled to Resonators with a View to Simultaneous Readout of 80 TES X-ray Microcalorimeters
3. 学会等名 18th Low Temperature Detectors (LTD18) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ohashi
2. 発表標題 Super DIOS Mission
3. 学会等名 IAU General Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎典子
2. 発表標題 X線マイクロカロリメータが拓く宇宙の新しい窓
3. 学会等名 日本学術振興会 146 委員会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ohashi
2. 発表標題 X-ray study of cosmic plasmas: present and future
3. 学会等名 Fifth International Meeting on Frontiers of Physics (IMFP2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Ohashi
2. 発表標題 Report of Hitomi (ASTRO-H)
3. 学会等名 XMM-Newton: The Next Decade (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Experimental Astrophysics Laboratory in TMU http://www-x.phys.se.tmu.ac.jp/home/wp/ Experimental Astrophysics Laboratory in TMU http://www-x.phys.se.tmu.ac.jp/home/wp/ Experimental Astrophysics Laboratory in TMU http://www-x.phys.se.tmu.ac.jp/home/wp/?page_id=106 http://www-x.phys.se.tmu.ac.jp/home/wp/</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山崎 典子 (Yamasaki Noriko) (20254146)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授 (82645)	
研究分担者	三石 郁之 (Mitsuishi Ikuyuki) (90725863)	名古屋大学・理学研究科・助教 (13901)	
研究分担者	田原 譲 (Tawara Yuzuru) (10135296)	名古屋大学・理学研究科・名誉教授 (13901)	