

令和元年6月19日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02070

研究課題名(和文) 硬X線望遠鏡で探る活動銀河核の構造と進化

研究課題名(英文) Study of the evolution of active galactic nuclei with hard X-ray telescopes

研究代表者

栗木 久光 (Awaki, Hisamitsu)

愛媛大学・理工学研究科(理学系)・教授

研究者番号：30252414

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,200,000円

研究成果の概要(和文)：銀河の中心には巨大ブラックホールが存在していることが明らかとなってきたが、この巨大ブラックホールの誕生と成長については依然謎のままであり、宇宙物理学の最重要課題の1つとなっている。この課題解明の鍵の一つが、大量の物質に隠された活動銀河核(AGN)である。我々は、透過力の高い硬X線帯域を含めた広帯域X線スペクトルを使って、これまで明らかでなかった隠されたAGNの活動性や周辺物質の構造を明らかにした。並行して、新たな隠されたAGNの選出法についての研究を行った。また、AGNの進化解明に必要な広帯域高角度分解能X線望遠鏡の開発を行い、局所的ではあるが20秒角に達した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巨大ブラックホールは、衝突・合体、質量降着によって成長したと考えられている。隠されたAGNは大量の物質をブラックホール周辺にまとめたAGNであり、質量降着で成長する場合、巨大ブラックホールはこの段階を通過したと考えられる。本研究で、この種のAGNの活動性や周辺物質の量を明らかにし、サンプル数を増やすことで、巨大ブラックホールの成長シナリオを検証・構築することが可能となる。また、観測からの進化シナリオの直接的な検証は、誕生間もない巨大ブラックホールや成長中のものを観測することである。我々の要素技術の開発は、この直接観測に必要な大面積高角度分解能X線望遠鏡につながるものである。

研究成果の概要(英文)：The birth and growth of a super massive black hole (SMBH) at the center of the galaxy has become one of the most important issues in astrophysics. The active galaxy nucleus (AGN) we focused on is a hidden AGN in a large amount of material, which is a key object to clarify SMBH evolution. We used a broad band X-ray spectrum, including the hard X-ray band above 10 keV, and revealed hidden AGN activity and surrounding material structures. The number of hidden AGNs detected is less than the prediction, and there may be more undetected AGNs. We studied a new method to find out the hidden AGNs in X-ray source catalogues. Direct verification of evolutionary scenarios of SMBH is to observe growing black holes. We have developed a carbon-fiber-reinforced plastic mirror with a monolithic Wolter type I geometry. The development of our elemental technology leads to the large-area high-angle resolution X-ray telescope required for this direct verification.

研究分野：X線天文学

キーワード：活動銀河核 X線 トーラス X線望遠鏡 CFRP

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

活動銀河核(AGN)は、宇宙の中で最も活動的な天体の一つであり、銀河中心に存在する超巨大ブラックホールに物質が降着することでその物質の持つ重力エネルギーが解放され、エネルギーを作っていると考えられている。しかし、この超巨大ブラックホールがいつどのように誕生し、成長してきたのか、未知のままで、現代天文学が解明すべき最重要課題の一つとなっている。特に、巨大ブラックホールは通常銀河にも存在しており、ブラックホールと銀河バルジ質量との関係から、銀河との共進化の可能性が指摘されている。ブラックホールの誕生と進化の研究は、銀河進化にもインパクトを与える研究となっている。

巨大ブラックホールの進化の解明には、AGNの構造と活動性を知る必要がある。前者はブラックホールを育んだ環境に、後者はブラックホールの規模に関係するためである。この研究には隠されたAGN、特に Compton thick 天体(CT AGN)と呼ばれる非常に強い吸収($N_H > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$)を受けた天体が鍵となる。CT AGN では、中心核からの強い X 線放射が視線方向の物質に遮られており、強い X 線によって照らされた周辺物質からの微弱な再放射を精度よく観測できる。この再放射を観測することで周辺物質の量や分布などを知ることが可能な天体である。また、CT AGN の観測例はまだ少ないが、AGN の大多数をしめるほど多く存在していると考えられている(例えば、Ueda+ 2003, Worsley+ 2005)。Worsley+2005 は、未検出の天体が赤方偏移 $z > 1$ の天体であると指摘しており、このことは過去に降着物質を多くまとった AGN が多数存在していることを意味している。ブラックホールが濃いガスの中で誕生し、大量の物質を降着し成長していることを連想させる。しかし、CT AGN は、10 keV 以下のエネルギー帯で隠されているため、XMM-Newton など 10 keV 以下の観測では、中心核の活動性、隠している物質の量とその構造など、その素性を知ることは難しい。「すざく」衛星は 10 keV 以上のエネルギー帯でもスペクトル取得が可能であり、「すざく」の広帯域スペクトルにより、ようやく少数の明るい天体において解明がはじまったところである。

2. 研究の目的

質量降着によって巨大ブラックホールに成長するためには、大量の物質が必要である。CT AGN は濃い物質に隠されており、成長段階のブラックホールであると考えられることができる。しかし、CT AGN の素性は不明瞭なところが多く、CT AGN を成長シナリオに結びつけるには、その素性や環境を知る必要がある。本研究では、近傍の明るい CT AGN の広帯域 X 線スペクトルを使って、CT AGN の素性を明らかにする。環境について統計的議論を行うには、CT AGN の観測例をできるだけ増やす(可能な限り無バイアスになるくらい)必要がある。このための CT AGN の選出方法を開発する。

また、私たちは、X 線天文衛星「ひとみ」の製作・開発に携わってきた。「ひとみ」衛星は、0.3~80 keV までの広帯域撮像分光観測ならびに 10 keV までの高分散スペクトル観測を特徴とする衛星である。これらの特徴は AGN の周辺構造や周辺物質の電離度や運動の測定に威力を発揮する。我々は、衛星軌道上でその能力が発揮されることを観測データを使って示す。

さらに、CT AGN の個数密度を調べるためには、硬 X 線帯域での大面積高角度分解能の望遠鏡を使って、CXB を点源に分解することが直接的である。角度分解能約 60 秒角の硬 X 線天文衛星 NuSTAR では CXB の約 10~20%程度が点源に分解できるが、20 秒角の角度分解能を実現することで、CXB の大半(約 80%)を点源に分解することになる。そこで、我々は、10 keV~60 keV のエネルギー帯域で 20 秒角以下の高角度分解能望遠鏡を目指し、必要な要素技術を開発する。この望遠鏡により NuSTAR よりも点源感度が一桁向上し多くの未検出の天体が観測されることになる。

3. 研究の方法

(1) X 線観測衛星を使った Compton thick 天体を含む AGN の観測的研究

CT AGN のスペクトルは非常に複雑であり、素性を明らかにするにはこの複雑なスペクトルを分解する必要がある。狭い帯域での観測では、この分離は困難である。そこで、「すざく」衛星をはじめとして、NuSTAR 衛星、Swift 衛星等で 10 keV 以上の硬 X 線帯域での分光観測データと XMM-Newton などのデータとを組み合わせ広帯域スペクトルを作成する。放射モデルも円盤からの反射モデルを使用するのではなく、トーラス構造を持つ AGN から放射される X 線スペクトルを再現したシミュレーションベースのモデルを適用する。これにより、これまで不明瞭だった AGN の活動性とトーラスの構造(物質の量と分布)を明らかにする。トーラスは密度が一樣ではなく、濃い小さな塊を持つ Clumpy な構造をしていると考えられている。広帯域スペクトルと一様密度トーラスモデルとの比較から、Clumpy トーラスモデルの可能性を調べる。

また、XMM-Newton 衛星などでカタログが整備され、赤外線などの様々な波長で大規模な天体カタログが構築され、公開アクセスが可能となってきた。これにより、多波長データを使った相関や選別が容易に行えるようになった。各波長帯域での CT AGN の特徴を踏まえ、効率的な選別方法を開発する。

(2) ひとみ衛星搭載用硬 X 線望遠鏡の開発

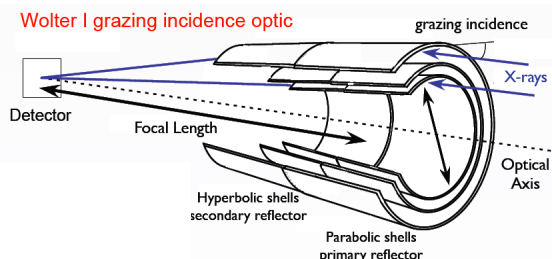
ASTRO-H 衛星(「ひとみ」)は、2016 年 2 月に打ち上げられた我が国の X 線天文衛星である。0.3~80 keV までの広帯域撮像分光観測ならびに 10 keV までの高分散スペクトル観測が特徴であり、周辺の構造や周辺物質の電離度や運動の測定に威力を発揮する。「ひとみ」衛星搭載の各検出器が捉えた

X線データを元に、当初の計画通りの性能を発揮しているかどうかを試験観測期間に得られたデータを使って検証する。

この衛星には硬X線望遠鏡(HXT)が搭載されており、栗木と松本はHXT開発の責任者である。本研究がスタートした時期は、HXTの製造がほぼ終了し、HXTの応答関数を一般ユーザーに提供するための研究を集中的に行っていた時である。応答関数は、HXTチームが提供する較正データを元に、光線追跡法を用いたシミュレーションツールで作成される。我々は、大型軌道放射光施設SPRING-8にて取得した地上試験データをもとに、この較正データを作成し、ソフトウェアチームに提供する。最終的な較正データは、衛星軌道上で取得した標準X線天体「かに星雲」を観測し、得られたスペクトルから決められる。

(3) 硬X線望遠鏡の開発

大面積高角度分解能化を実現するためには、光学系を忠実に再現した軽量の反射鏡を製作する必要がある。右図はX線光学系として用いられるウォルター(Wolter)光学系の模式図である。放物面と双曲面の2つの反射面から構成される。高角度分解能化のために我々が着目した素材は、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)である。CFRPは比強度が高く、熱膨張率が金属よりも小さいため寸法安定性が高く、成型性の点でも優れている。ただし、そのままでは鏡面として利用できないので、CFRPの上にX線反射面を形成する必要がある。



CFRP望遠鏡実現のための要素開発を次の①～③の順番で行う。

①高精度基板の製作→②高精度基板への反射面形成→③高精度反射鏡の位置決め法

③は、X線反射鏡を望遠鏡として組み上げる場合、如何に精度よく反射鏡を設計値通りに配置するかその方法を開発することである。

製作する反射鏡は、口径200mm、長さ300mm(2段合わせて)、厚み0.4mmの1/4周鏡である。これを4枚円周上に配置し、図にあるように全周をカバーする。本研究のようにウォルター光学系を1枚の基板で忠実に再現することで、アライメント誤差などの結像性能の劣化は大幅に軽減される。

4. 研究成果

(1) CT AGNの観測的研究

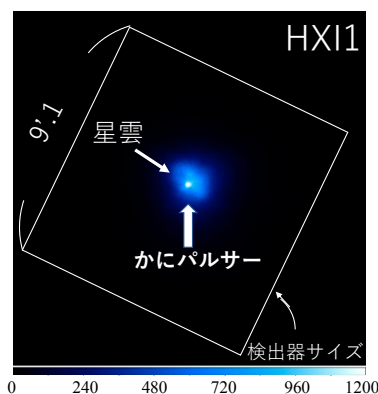
活動銀河核の周辺構造と進化の研究に関しては、私たちが開発したシミュレーションベースのモデルをNASA/GSFCのweb siteからe-torusモデルとして公開し、世界中の研究者が利用できるようにした。「すざく」衛星で観測した複数の隠されたAGNから広帯域X線スペクトルを取得し、そのスペクトルに対してシミュレーションモデルを適用した。シミュレーションモデルは隠されたAGNのX線スペクトルをよく再現し、①トラスからのX線の寄与を正しく評価しないと、隠された中心核の活動性を間違えて推定してしまうことを指摘した。また、②トラスの持つ物質の柱密度や開口角を決定し、物質分布に関する制限をつけるなどの成果をあげた。②では、トラスがclumpyな構造をしている可能性も合わせて指摘している。

AGNはX線帯域で明るく輝いていることから、X線観測はAGN活動性を検出するのに適したバンドである。XMM-Newtonが作成したX線天体のカタログと赤外線カタログを用いて、隠されたAGN候補の天体を抜き出し、次にX線スペクトル解析を行なって、候補天体が隠されたAGNの兆候を示すかどうか調査した。その結果、多くが隠されたAGNの兆候を示し、X線と赤外線を使って選別する方法が有効であることを示した。また、「すばる」JHSC surveyで検出された天体のうち、可視光で暗く、X線で明るい天体を選別する手法を確立し、これまでに知られていなかったAGNを新たに発見した。

この他にも、広帯域X線スペクトルと他波長データを用いて、低活動銀河核の放射モデルならびに合体銀河内のAGN活動性に関する研究、赤外線観測のデータを使用してエディントン比に着目した放射機構の違いに関する研究などを行った。

(2) 「ひとみ」衛星の開発

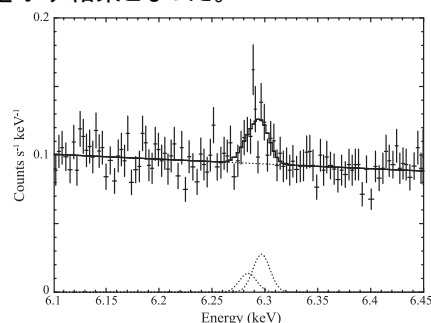
「ひとみ」衛星搭載の硬X線望遠鏡の応答関数は、HXTチームが提供する較正データを元に、光線追跡法を用いたシミュレーションツールで作成される。我々は、大型軌道放射光施設SPRING-8にて2台のHXTの較正試験を実施し、ここで取得した地上試験データをもとに、較正データを作成した。この較正データは打ち上げ前の観測天体の立案に大いに活用された。そして、打ち上げ後に、衛星軌道上で取得した標準X線天体「かに星雲」のスペクトルから最終的な較正データを決めた。HXTでは、打ち上げ前に作成した較正データをわずかに微調するだけで「かに星雲」のX線スペクトルを再現できることができ、これは、地上での較正試験が正しく行われていたこと、衛星軌道上で地上と同様の性能が発揮さ



れたことを示す結果である。HXT は名古屋大学が中心となり、愛媛大学、宇宙科学研究所などの教育研究機関が参加して製作したものである。大学の研究室規模で衛星搭載品を製作した例は、世界的にみても稀であり、日本での望遠鏡製作技術が確立したことを示す結果となった。

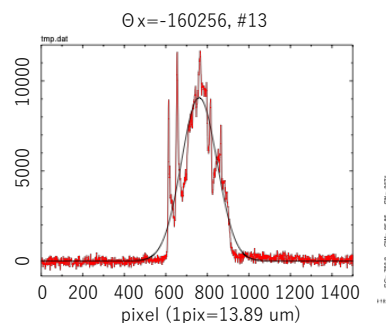
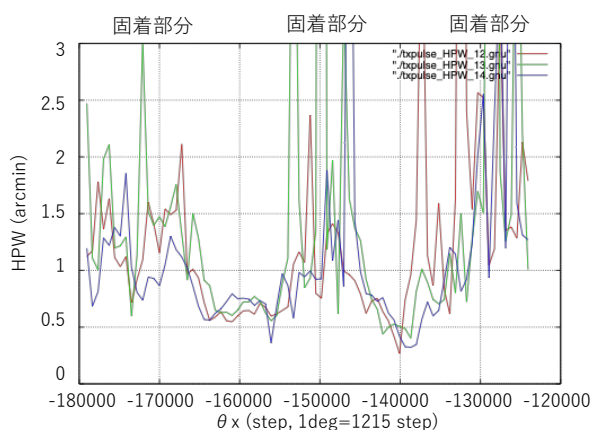
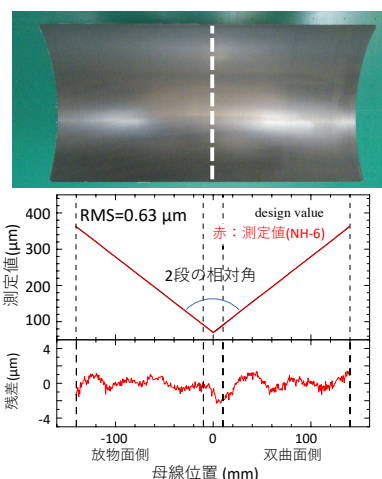
また、「ひとみ」衛星が試験観測中に行った観測データを解析し、所定の性能が出ているのか科学的成果を創出することで確認した。中でも活動銀河核 NGC1275 からの鉄輝線は過去最高の精度で輝線幅 (500~1600 km/s) を決定することができ、周辺物質の位置に制限を与えた(右図)。

「ひとみ」衛星による成果を Nature に 2 編、PASJ に特集号として報告するとともに、米国の天文学会誌などにて発表している。



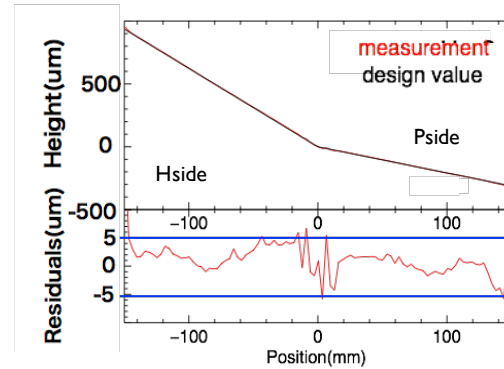
(3) 高角度分解能硬 X 線望遠鏡の開発

高形状精度 CFRP 基板の製作では、熱膨張率がほぼ 0 のスーパーインバー製の成形金型を導入し、CFRP を加熱硬化する時の金型の変形を抑制した。これにより成形品の形状誤差 (rms) は 2.9 ミクロン (7 サンプルの平均値) となり、従来よりも良品の出る割合が増加した。右図は CFRP 基板とその形状測定結果の一例である。次に、CFRP 上への反射面形成法として、レプリカ法を実施した。レプリカ法は「すざく」衛星や「ひとみ」衛星搭載 X 線望遠鏡で使用された方法である。名古屋大学にて、レプリカ法による成膜を行った後、可視光による結像性能評価を行ったところ、局所的に 50~60 秒角 (HPD) を得た。X 線測定でも本研究の目標であった 20 秒角 (HPD) を切る性能を局所的に得た。しかし、ウォルター形状の基板全体で 20 秒角を切るには、双曲面または放物面 1 段だけの「ひとみ」衛星搭載用反射鏡とは異なった技術的困難さがあり、習熟が必要である。レプリカ法での鏡面形成は現体制では困難と判断し、簡便な方法として、超薄板ガラス (50 μm 厚) を CFRP 基板表面に貼り付けることとした。この方法は簡便な上に、ガラスへの金属成膜を CFRP 形成の工程と独立に行えるという利点がある。点状に接着剤を塗布しガラスを固着したところ、固着部分で結像性能が劣化するものの、それ以外の領域で 40'' (HPD) を達成していた。下図は SPring-8 にて鏡の表面を X 線ビームでスキャンして得た結果である。下左図の横軸は円周方向の角度、縦軸は角度分解能 (HPW) を表す。下右図は接着剤を塗布していない箇所での X 線反射像 (HPW=40 秒角) である。固着法には改良の余地が十分あることから、薄板ガラスを貼り付けて鏡面を形成する方法が有効であると考えている。実際、その後の改良により、可視光評価ではあるが、固着部分で見られたような結像性能の劣化が見られない反射鏡が出来上がりつつある。



位置調整では、 piezoelectric actuator と位置測定用のレーザー変位計 (分解能 0.01 ミクロン) を導入した。piezoelectric actuator は、サブミクロンの精度でロッドと呼ばれる可動部を押し引きできるものである。レーザー変位計で測定しながら、piezoelectric actuator で CFRP 基板の位置調整を行なったところ、目標値との差 1 μm 以下で調整ができた。この方法で基板の母線に沿った 5カ所の地点で位置調整を行い、基板位置の目標値からのズレを ±5 μm 以下 (PV 値) におさめることができた (次ページ図)。もう一つの目標である反射鏡の積層に関しては、積層時の位置調整・固定に関する課題を抽出しており、今年度、ウォルター型基板の積層を実施する予定である。

さらに、本研究で得た AGN や機器開発に関する知見を将来計画に役立てるために、Athena, FORCE など現在計画/進行中の大小の飛行体計画にワーキングメンバーやコアメンバーとして積極的に参加している。その成果を学会等で発表した。



5. 主な発表論文等

雑誌論文 50 件 (内、査読無 10 件)、学会発表等 85 件(内、国際学会 19 件)から主な発表論文等として、それぞれ 10 件を抜粋した。

[雑誌論文](計 10 件)

1. Awaki, H., Oue, C., Iwakiri, H., Omatsu, M., Yoshida, T., Yokota, T., Ishida, N., and Matsumoto, H., “Development of a lightweight x-ray mirror using thin carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP)”, Proceedings of the SPIE, 10699, 106993R (2018) 査読無
2. Tashiro, M., et al. (including Awaki, H., Matsumoto, H., and Terashima, Y.), “Concept of the X-ray Astronomy Recovery Mission”, Proceedings of the SPIE, 10699, 1069922 (2018) 査読無
3. Matsumoto H., Awaki H., et al., “Inorbit performance of the Hard X-ray Telescope (HXT) on board the Hitomi (ASTRO-H) satellite”, JATIS, 4, 011212 (2018)
4. Mori H., Miyazawa T., Awaki H., Matsumoto H., et al., “On-ground calibration of the Hitomi Hard X-ray Telescopes”, JATIS, 4, 011210 (2018)
5. Tanimoto A., Ueda Y., Kawamuro T., Ricci C., Awaki H., and Terashima Y., “Suzaku Observations of Heavily Obscured (Compton-thick) Active Galactic Nuclei Selected by the Swift/BAT Hard X-Ray Survey”, ApJ, 853, 146 (2018)
6. Hitomi Collaboration (including Awaki, H., Matsumoto, H. and Terashima, Y.), “Hitomi observation of radio galaxy NGC 1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K α line emission from an active galactic nucleus”, PASJ, 70, 13 (2018)
7. Hitomi Collaboration (including Awaki, H., Terashima, Y., and Matsumoto, H.), “The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster”, Nature, 535, 117, (2016)
8. Awaki, H., Sugita, S., Ogi, K., Yoshioka, K., Matsumoto, H., Mitsuishi, I., and Tawara, Y., “Development of an x-ray telescope using the carbon fiber reinforced plastic”, Proceedings of the SPIE, 9905, 990571 (2016) 査読無
9. Mori, K., et al. (including Awaki, H., and Matsumoto, H.), “A broadband x-ray imaging spectroscopy with high-angular resolution: the FORCE mission”, Proceedings of the SPIE, 9905, 990510 (2016) 査読無
10. Terashima, Y., Hirata, Y., Awaki, H., Oyabu, S., Gandhi, P., Toba, Y., and Matsuhara, H., “A New Sample of Obscured AGNs Selected from the XMM-Newton and AKARI Surveys”, ApJ., 814, 11 (2015)

[学会発表](計 10 件)

1. 寺島雄一, 「低光度活動銀河核の観測」, 高感度・広帯域 X 線観測で探るブラックホール降着現象の物理(招待講演), 2019 年
2. 粟木久光, 吉田鉄生, 相田 望, 松本浩典, 米山友景, 井出峻太郎, 三石郁之, 大塚康司, 清水貞行, 田村啓輔, 中澤知洋, 石田 学, 前田 良知, 中庭 望, 「炭素繊維強化プラスチック (CFRP) への X 線反射面形成法の開発 II」, 日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年
3. 田村啓輔 他 (含 粟木久光, 松本浩典), 「南極周回気球による硬 X 線偏光観測実験 X-Calibur の 2021 年将来フライトへ向けて」, 日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年
4. 松本浩典, 粟木久光 他, 「小型衛星計画 FORCE 用の X 線反射鏡開発の現状」, 日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年

5. Terashima, Y., “Feedback in local AGN and star-forming galaxies”, Exploring the Hot and Energetic Universe: The second scientific conference dedicated to the Athena X-ray observatory(国際学会), 2018年
6. Awaki, H., Oue, C., Iwakiri, H., Omatsu, M., Yoshida, T., Yokota, T., Ishida, N., Matsumoto, H., “Development of a lightweight x-ray mirror using thin carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP)”, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation(国際学会), 2018年
7. 松本浩典, 「ひとみ衛星の成果と将来への展望」, 第17回高宇連研究会(招待講演), 2018年
8. 松本浩典 他, 「X線天文衛星 Athena 計画」, 日本天文学会 2017年秋季年会, 2017年
9. Awaki, H., Matsumoto, H. et al., “The Hitomi (ASTRO-H) Hard X-ray Telescope (HXT) : current status of calibration”, SPIE Optics+Photonics(国際学会), 2017年
10. 谷本 敦, 上田佳宏, 川室太希, Claudio Ricci, 栗木久光, 寺島雄一, 「非常に大きな吸収を受けた活動銀河核の『すぎく』広帯域X線スペクトル系統解析」, 日本天文学会 2017年春季年会, 2017年3月, 九州大学伊都キャンパス

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

TORUS model (e-torus)

<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xanadu/xspec/models/etorus.html>

愛媛新聞 2016年1月1日号にX線天文衛星「ASTRO-H」搭載硬X線望遠鏡開発に関する記事が掲載された。

解説記事: 「光学」45巻9号 特集: 宇宙・惑星の起源を探るX線光学 「X線望遠鏡用ウォルター型ミラーの開発とその利用」 栗木久光

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 松本浩典

ローマ字氏名: Hironori Matsumoto

所属研究機関名: 大阪大学

部局名: 理学研究科

職名: 教授

研究者番号 (8桁) : 90311365

研究分担者氏名: 寺島雄一

ローマ字氏名: Yuichi Terashima

所属研究機関名: 愛媛大学

部局名: 理工学研究科

職名: 教授

研究者番号 (8桁) : 20392813

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。