

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800095

研究課題名(和文)活動銀河核セントラルエンジンの新描像を確立するX線と可視光の同時観測

研究課題名(英文)X-ray and Optical Simultaneous Studies of the Central Engine in Active Galactic Nuclei

研究代表者

野田 博文(Hirofumi, Noda)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：50725900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、セイファート銀河中心の巨大ブラックホール(BH)への降着流の状態を調べるため、「すざく」衛星と日本の地上望遠鏡を組み合わせ、X線と可視光の同時モニタを行った。その結果、BHに落ちる物質の量が少ない時期には、BHの遠方で円盤状だった降着流が、近傍では熱く移流優勢の状態に変わっている描像が見えてきた。

セイファートの観測と並行して日本のX線天文衛星「ひとみ」に搭載する検出器の地上試験に参加し、性能を検証した。打ち上げ後の1ヶ月間、軌道上で地上と同等の性能を発揮していることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to examine states of accretion flows onto Super Massive Black Holes (SMBHs) in Seyfert galaxies, we conducted X-ray and optical simultaneous monitoring by utilizing the Suzaku satellite and Japanese ground-based telescopes. As a result, we obtained a possibility that when the amount of materials swallowed into a SMBH is small in a Seyfert, a standard accretion disk does not reach down to an event horizon of a SMBH, and a hot accretion flow is formed like the low/hard state of black hole binaries.

In parallel, we performed ground tests of instruments onboard the Japanese X-ray satellite Hitomi. For a month after its launch, we confirmed that the almost same performance as that in ground was achieved in the orbit.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線天文学 ブラックホール 科学衛星 熱設計

1. 研究開始当初の背景

(1) セイファート銀河は近傍宇宙における主要な活動銀河核であり、様々な波長の観測により研究されている。しかし、その巨大ブラックホール(BH)への降着流の状態は未だに議論が続いている。私は、セイファート銀河の X 線観測から、BH 周辺に複数の X 線生成領域が形成され、そこから、光子指数  $\Gamma < 1.7$  という硬いスペクトル形を持つ「ハード一次 X 線」および  $\Gamma > 2.1$  の軟らかいスペクトルを持つ「ソフト一次 X 線」という複数の一次 X 線成分が生成されている示唆を得た(野田他 2013, 2014)。

(2) 日本の 6 番目の X 線天文衛星「ひとみ」は、0.5-12 keV 帯域で 7 eV というこれまでにない高いエネルギー分解能を実現するとともに、0.3-600 keV という広帯域を高い感度で同時に観測することができる。2014—2015 年度にかけては、2015 年度末に予定された打ち上げに向け、JAXA 筑波宇宙センターにて、地上の性能確認試験が行われ、その後、種子島宇宙センターにて打ち上げ前の性能確認試験の後、打ち上げが行われた。

2. 研究の目的

(1) 野田他 (2013, 2014) が発見したセイファート銀河が持つ「ハード一次 X 線」と「ソフト一次 X 線」をそれぞれ生成する X 線生成領域が、BH の周囲にどのように分布するかを調べ、BH への降着流がどのような状態を持つのか明らかにする。これにより、活動銀河核セントラルエンジンの描像を確立する。

(2) 私はこれまで、「ひとみ」衛星に搭載される検出器を、衛星軌道上で許容動作温度に保つための「熱設計」を行ってきた。本研究では、衛星に搭載した状態で、検出器が熱設計通りの温度を実現しているかをテストし、ロケットによる軌道上への打ち上げに備える。打ち上げ後は、軌道上の温度が設計通りか検証する。

3. 研究の方法

(1) BH 周囲には円盤が形成されることが知られ、降着円盤と呼ばれる。降着円盤の温度は 1 万°C 程度であり、可視光を放射する。そこで、野田他 (2013, 2014) が発見した複数の X 線成分を分解した上で、可視光との強度相関や時間遅延を調べることで、それぞれの X 線放射領域が降着円盤の近くに位置するか遠くに位置するかを明らかにできる。本研究では、セイファート銀河の X 線と可視光の同時モニタ観測を行い、BH 周囲の X 線放射領域の幾何を調べる。

(2) 「ひとみ」衛星に搭載した状態の検出器の熱設計を検証するため、住友重機械工業新居浜工場および、JAXA 筑波宇宙センターで行われる地上試験に参加する。その後、JAXA 種子島宇宙センターで行われる、打ち上げ前の最終試験にも参加し、万全の状態での打ち上げに臨む。打ち上げ後は、軌道上の検出器の温度データを調べ、地上で予測した温度になっているかどうかを調べる。

4. 研究成果

(1) 2013 年から 2014 年にかけての ~1 年間、X 線天文衛星「すざく」と日本の 5 台の地上可視光望遠鏡(北海道大学の「ピリカ」望遠鏡、東京大学の木曾シュミット望遠鏡、東京工業大学の MITSuME 望遠鏡、兵庫県立大学の「なゆた」望遠鏡、広島大学の「かなた」望遠鏡)を用いて、セイファート銀河 NGC 3516 をモニタ観測した。その結果、X 線と可視光ともに、これまでの NGC 3516 の観測の中でも、特に暗い時間帯の信号を捉えることに成功した。

X 線データに対してスペクトル解析を行い、野田他 (2013, 2014) で発見された複数の一次 X 線成分のうち、「ハード一次 X 線」が卓越していたことがわかった。このハード一次 X 線のみ強度変動に着目したところ、1 年間のモニタの中で、2013 年 4-5 月に一桁以上も光度を変化させていたことが分かった(図 1)。

一方の可視光(Bバンド)のデータでは、BH 周囲の信号が暗い時間帯だったため、母銀河からの信号が無視できなかった。そこで、母銀河の信号を差し引いた上で測光する「差分測光法」を適用し、フラックスの変化を調べた。その結果、図 1

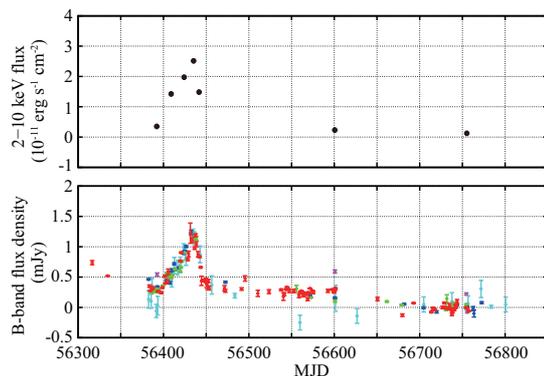


図 1: 野田他(2016)の図 4。(上) 2013-2014 年に「すざく」で観測した NGC 3516 のハード一次 X 線のフラックス変動。(下)「すざく」と同時に、「ピリカ」(赤)、木曾シュミット望遠鏡(緑)、MITSuME(紫)、「なゆた」(青)、「かなた」(シアン)で観測した B バンドフラックス密度。MJD=56400 は 2013 年 4 月 18 日に対応。

に示す通り、可視光放射も、X線放射と同様に、2013年4-5月に最も強度変動があり、硬い一次X線成分の強度変動と足並みを揃えていたことが明らかになった。

1997年から2000年にかけて行われたNGC 3516のX線-可視光同時モニタでは、X線の明るさが本研究よりも~2-10倍明るい時期を捉えるとともに、X線と可視光の強度の相関が有意に悪かったことが分かっている(Maoz et al. 2002)。本研究との比較することで、野田他(2013, 2014)で発見されたハード一次X線成分とソフト一次X線成分のうち、明るい時に卓越するソフト一次X線成分は可視光との相関が悪い一方、ハード一次X線成分は可視光との相関が良いことが分かった。これはハード一次X線成分を放射する領域が、降着円盤の近傍に広がっているホットな降着流であるという、BH周囲の状態の新しい可能性を、多波長観測の観点から示すことができた。

さらに、ハード一次X線の変動が、可視光よりも~2日間先行したことが判明した。これは、ホットな降着流の中で、X線を特に強く放射する領域から降着円盤までの距離を、光の速度で渡航するのに~2日かかることを示す。この結果から、ホットな降着流の広がりや量を定量的に制限する新しい方法を、世界で初めて提案することが出来た。

本研究ではハード一次X線を重点的に調べることができた一方、ソフト一次X線の可視光との強度相関を直接調べることができなかった。そこで、2015年に、X線天文衛星Swiftを用いて、NGC 3516を1ヶ月に2回ずつX線モニタ観測しておき、明るくなりソフト一次X線が卓越した時間帯に、「すざく」と日本の地上望遠鏡で同時に観測した。現在、得られたX線と可視光の観測データを解析しているところであり、今後、継続して行っていく。

- (2) 本研究では、「ひとみ」に搭載される複数の検出器の中でも、0.5-12 keV帯域で7 eVというこれまでにない高いエネルギー分解能を実現する精密軟X線分光装置(SXS)の開発に貢献した。SXSはX線カロリメータアレイを、衛星軌道上で50mKという極低温に安定に保つことにより、高いエネルギー分解能を実現するため、冷却システムが設計通り働くかが鍵となる。

私は、JAXAや住友重機械工業と協力して、SXSの多重シールド構造、冷凍機、液体ヘリウム蒸発冷却、内部の機器発熱などを再現した熱数学モデルを構築した。

これにより、冷凍機の動作状況や液体ヘリウムの量などを考慮して、SXS内部の温度分布を有限要素法により時系列でシミュレートできるようになった。

2014-2015年にかけて、住友重機械工業新居浜工場およびJAXA筑波宇宙センターにて、SXS単体の動作試験と「ひとみ」に搭載された状態の動作試験が行われた。私は、これらの試験に全面的に参加し、熱数学モデルによるシミュレーションで得られたSXSの温度分布と実測の比較を行い、冷凍機などの動作を検証し、設計通りの動作が実現されていることを確認した。

2015年12月より、JAXA種子島宇宙センターにて、「ひとみ」をロケットに搭載する前の動作試験が行われた。私は、この試験に参加し、熱数学モデルによるシミュレーションとの比較から、健全性を検証し、問題が無い事を確認した。また、打ち上げ時には、液体ヘリウムおよび冷凍機による冷却が止めるため、この打ち上げ条件を考慮したシミュレーションを行い、打ち上げ直後でも動作に問題が無い事を確認した(図2)。そして、2016年2月17日「ひとみ」打ち上げへと移行した。軌道上で液体ヘリウムと冷凍機の冷却が問題なく働き、2016年3月25日時点まで、ほぼ設計通りの温度が得られた(図2)。これにより、SXSの冷却システムが正常に動作したことを確認した。

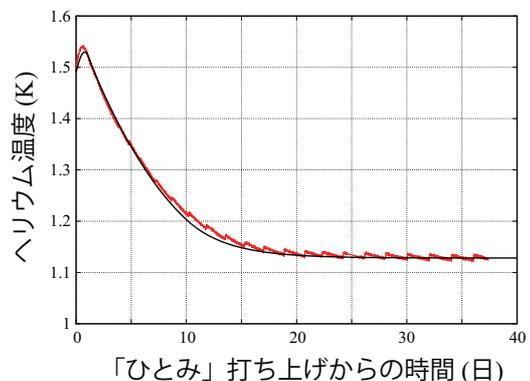


図2: 「ひとみ」打ち上げ(2016年2月17日)からの液体ヘリウム温度の変化。本研究で開発した熱数学モデルを用いたシミュレーションによる予測(黒)と軌道上実測温度(赤)がよく一致している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① Hirofumi Noda, Takeo Minezaki, Makoto Watanabe, Mitsuru Kokubo, Kenji

- Kawaguchi, Ryosuke Itoh, Kumiko Morihana, Yoshihiko Saito, Hikaru Nakao, Tomoki Morokuma, Mamoru Doi, Yoichi Itoh, Shin'ya Yamada, Kazuhiro Nakazawa, Yasushi Fukazawa, Kazuo Makishima, et al. "X-ray and Optical Correlation of Type I Seyfert NGC 3516 Studied with Suzaku and Japanese Ground-Based Telescopes" The Astrophysical Journal (ApJ), The Institute of Physics, 2016, in press [査読あり]
- ② Katsuma Miyake, Hirofumi Noda, Shin'ya Yamada, Kazuhiro Nakazawa, Kazuo Makishima, "The new primary X-ray component confirmed in the Seyfert I galaxy IC 4329A", Publications of the Astronomical Society of Japan, 2016, in press[査読あり]  
DOI: 10.1093/pasj/psw025
- ③ Yasushi Fukazawa, Shun'ya Furui, Kazuma Hayashi, Masanori Ohno, Kazuyoshi Hiragi, Hirofumi Noda, "Fe-K Line Time Variability and Ni Abundance of Distant Reflectors in Seyfert Galaxies", The Astrophysical Journal (ApJ), The Institute of Physics, 2016, 821, 15 [査読あり]  
DOI: 10.3847/0004-637X/821/1/15
- ④ Hirofumi Noda, "Novel Picture of the AGN Central Engine Established by X-ray and Optical Simultaneous Studies", Publications of the Korean Astronomical Society (PKAS), The Korean Astronomical Society, 2015, 30, 417 [査読あり]  
DOI: 10.5303/PKAS.2015.30.2.417
- ⑤ Hirofumi Noda, Kazuo Makishima, Shin'ya Yamada, Kazuhiro Nakazawa, Soki Sakurai, Katsuma Miyake, "*Suzaku* Studies of the Central Engine in the Type I Seyfert NGC 3227: Detection of Multiple Primary X-ray Continua with Distinct Properties", The Astrophysical Journal (ApJ), The Institute of Physics, 2014, 794, 2 [査読あり]  
DOI: 10.1088/0004-637X/794/1/2
- ⑥ Kazuhisa Mitsuda, Richard Kelly, Hiroki Akamatsu, Elisa Constantini, Jan-Willem den Herder, Ryuichi Fujimoto, Caroline Kilbourne, Dan McCammon, Scott Porter, Hirofumi Noda<sup>1A</sup> (31 番目), et al. "Soft x-ray spectrometer (SXS): the high-resolution cryogenic spectrometer onboard ASTRO-H", SPIE, Space Telescopes and instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray, 2014, 9144E, 2A [査読なし]  
DOI: 10.1117/12.2057199
- ⑦ Yasushi Fukazawa, Hiroyasu Tajima, Shin Watanabe, Katsuhiro Hayashi, Kazuhiro Nakazawa, Hirofumi Noda (19 番目) et al., "Soft gamma-ray detector (SGD) onboard the ASTRO-H mission", SPIE Space Telescopes and instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray 2014, 9144, 2 [査読なし]  
DOI: 10.1117/12.2055292
- ⑧ Tadayuki Takahashi, Kazuhisa Mitsuda, Richard Kelley, Hiroki Akamatsu, Kazuhiro Nakazawa, Jan-Willem den Herder, Jelle Kaastra, Hirofumi Noda (146 番目), et al. "The ASTRO-H X-ray astronomy satellite", SPIE, Space Telescopes and instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray, 2014, 9144, 25 [査読なし]  
DOI: 10.1117/12.2055681
- ⑨ Hirofumi Noda, Kazuhiro Nakazawa, Kazuo Makishima, Naoko Iwata, Hiroyuki Ogawa, Masayuki Ohta, Goro Sato, Madoka Kawaharada, Shin Watanabe, Motohide Kokubun, Tadayuki Takahashi, Masanori Ohno, Yasushi Fukazawa, Hiroyasu Tajima, Hideki Uchiyama, Shuji Ito, Keita Fukuzawa, and HXI/SGD team, "Thermal Design of Hard X-ray Imager and the Soft Gamma-ray Detector onboard ASTRO-H", SPIE, Space Telescopes and instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray, 2014, 9144, 5E [査読なし]  
DOI: 10.1117/12.2055379
- ⑩ Goro Sato, Motohide Kokubun, Kazuhiro Nakazawa, Teruaki Enoto, Yasushi Fukazawa, Madoka Kawaharada, Hirofumi Noda (19 番目), et al. "The Hard X-ray Imager (HXI) for the ASTRO-H Mission", SPIE, Space Telescopes and instrumentation: Ultraviolet to Gamma Ray, 2014, 9144, 27 [査読なし]  
DOI: 10.1117/12.2055629
- ⑪ Shin Watanabe, Hiroyasu Tajima, Yasushi Fukazawa, Yuto Ichinohe, Shin'ichiro Takeda, Teruaki Enoto, Kazuhiro Nakazawa, Hirofumi Noda (16 番目), Hirokazu Odaka, Atsushi Togo, Shinji Tomizuka, "The Si/CdTe semiconductor Compton camera of ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector (SGD)", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors, and Associated Equipment, Elsevier, 2014, 765, 192 [査読あり]  
DOI: 10.1016/j.nima.2014.05.127

〔学会発表〕（計 13 件）

- ① 野田博文、満田和久、山崎典子、竹井洋、岡本篤、藤本龍一、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、石川久美、三石郁之、M. DiPirro、P. Shirron、吉田誠至他 ASTRO-H SXS チーム、“ASTRO-H 搭載 精密軟X線分光装置SXS の初期運用熱解析” 日本天文学会春期年会、V341a、2016年3月14-17日、首都大学東京・東京都・八王子市
- ② Hirofumi Noda, “Accretion and Winds in AGNs” Prospects, challenges and evolution of AGN modeling in the ASTRO-H Era, 2015 October 21-22, Rikkyo University・Tokyo・Toshima-ku
- ③ Hirofumi Noda, “Development of Instruments onboard ASTRO-H for Future X-ray Studies of Tori”, Torus 2015 – The Unification Scheme After 30 Years-, 2015 September 13-17, Southampton, UK
- ④ 野田博文、“多波長時間変動から迫る巨大ブラックホール降着流の放射と幾何” 超巨大ブラックホール降着円盤スペクトルの解釈を巡って、2015年8月11-12日、宇宙科学研究所・神奈川県・相模原市
- ⑤ Hirofumi Noda, “State Transition of AGNs” Max’s Four Questions in X-ray Astronomy To Be Addressed With ASTRO-H, 2015 July 31, The University of Tokyo・Tokyo・Bunkyo-ku
- ⑥ 野田博文、峰崎岳夫、牧島一夫、中澤知洋、諸隈智貴、小久保充、土居守、山田真也、河口賢至、伊藤亮介、川端弘治、深沢泰司、中尾光、渡辺誠、森鼻久美子他 “X線と可視光で調べる巨大ブラックホール周辺の降着流の幾何” 降着円盤大研究会 2015、2015年6月21-22日、京都大学・京都府・京都市
- ⑦ Hirofumi Noda, Teruaki Enoto, “The Cook Book for Spectral Analyses with ASTRO-H/SXS,” Spectroscopy of Cosmic Plasma in the Era of ASTRO-H, 2015 May 25 – 29, Aoyama-Gakuin University・Kanagawa・Sagamihara-shi
- ⑧ 野田博文、峰崎岳夫、牧島一夫、中澤知洋、諸隈智貴、小久保充、土居守、山田真也、河口賢至、伊藤亮介、川端弘治、深沢泰司、中尾光、渡辺誠、森鼻久美子他 “セイファート NGC 3516 の X線と可視光の間に見られた光度変動の遅延” 日

本天文学会春季年会、S30a、2015年3月18-21日、大阪大学・大阪府・豊中市

- ⑨ 野田博文、牧島一夫、山田真也、中澤知洋、三宅克馬、「セイファート NGC 3227 が示す巨大ブラックホールへの降着流の状態遷移」、日本天文学会秋季年会、S29a、2014年9月11-13日、山形大学・山形県・山形市
- ⑩ Hirofumi Noda, “Novel Picture of the AGN Central Engine Established by X-ray and Optical Simultaneous Studies” 12th Asia-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM 2014), 2014 August 18-22, Daejeon, Korea
- ⑪ Hirofumi Noda, “Suzaku Studies of Soft and Hard X-ray Excess Variability in Active Galactic Nuclei”, AGN symposium in SRON, 2014 July 2-4, Utrecht, Netherland
- ⑫ Hirofumi Noda, Kazuo Makishima, et al. “Understanding X-ray Spectral and Timing Characteristics of Active Galactic Nuclei by a Novel Picture with Multiple Primary Emission”, The X-ray Universe 2014, 2014 June 22-25, Dublin, Ireland
- ⑬ 野田博文、“活動銀河核エンジンの新描像に基づくX線-可視光の同時観測” AGN ワークショップ 2014、2014年4月24-25日、国立天文台・東京都・三鷹市

〔図書〕（計 1 件）

- ① Hirofumi Noda, “X-ray Studies of the Central Engine in Active Galactic Nuclei with Suzaku”, Springer 出版, Springer Theses – the “best of the best”, 2015, 153 pages

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕（計 0 件）

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 博文 (Hirofumi Noda)

国立研究開発法人 理化学研究所 仁科加速器研究センター 基礎科学特別研究員

研究者番号：50725900