

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06896

研究課題名(和文) ASTRO-Hによるブラックホールジェット噴出機構のプラズマ組成分析

研究課題名(英文) Study of plasma composition of black hole jet with ASTRO-H

研究代表者

小山 志勇 (Koyama, Shu)

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・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：80758186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：X線天文衛星「ひとみ」(ASTRO-H)の開発試験、打ち上げ、軌道上における運用に携わり、世界で初めてX線マイクロカロリメータによる天体観測を実現した。また時刻較正を主導し50  $\mu$ s以下の優れた相対時刻精度をもつことを示した。

残念ながら2016年3月に衛星を喪失し、本研究で計画していたブラックホール天体の観測を行うには至らなかったものの、代替として「すざく」衛星のデータアーカイブを用いた系統的なブラックホール天体の解析を進めている。これにともない、X線時刻精度劣化を発見し、原因究明を行った。補正を施すことで、180 msまで劣化していた精度を1 ms程度まで改善できることを示した。

研究成果の概要(英文)：We contributed to Hitomi (ASTRO-H) the integration, tests on ground, launch and operation in orbit, and achieved to the world's first astronomic observation with a X-ray microcalorimeter. We took the lead of timing calibration of the X-ray microcalorimeter and established to below 50  $\mu$ s of the relative timing accuracy.

Although we lost the satellite in March 2016 unfortunately, we worked on systematic study of black holes using the data archive of Suzaku satellite. Then we found a degradation of time assignment of X-ray data in the Suzaku archive. We investigated and resolved the cause of degradation. We also developed a correction method of the degradation and success to improvement of the time assignment accuracy from about 180 ms to 1 ms.

研究分野：宇宙物理実験

キーワード：X線 ブラックホール

### 1. 研究開始当初の背景

ブラックホールジェットの噴出メカニズムとして大きな問題となるのが、バリオンの加速メカニズムである。超巨大ブラックホールのジェットは最高エネルギー宇宙線の加速源の候補とされているものの、バリオンで構成されたジェットの証拠は1件しか得られていない(Wardle et al. 1998)。ほとんどのジェットはレプトンジェットで説明がついてしまっている。

一方で近年、輻射磁気流体シミュレーションにより、輻射圧と重力のつり合いであるエディントン限界を超えた超臨界降着円盤という極端に降着率の大きい状態が再現し、このとき降着円盤からバリオンジェットが噴出している可能性が示された(Ohsga et al. 2009)。

ここで一つの定性的な解釈として、降着率の高い円盤の状態ではバリオンジェットを噴いていたが、降着率がエディントン限界より小さい状態ではレプトンジェットとなっている、ということが考えられる。しかし、超巨大ブラックホールの降着活動は緩やかでありこの仮説を観測、確認することは難しい。そこで恒星質量ブラックホールに注目する。恒星質量ブラックホールは今まさに活動の最中にあり、降着円盤の状態に依存したジェット噴出を検証することができる。

### 2. 研究の目的

ジェットの力学的エネルギーの行き先のうち、観測されうる過程は電波から軟ガンマ線に広がるシンクロトロン成分と、高エネルギーガンマ線帯域の逆コンプトン散乱と陽子衝突に伴う $\pi^0$ 崩壊ガンマ線が考えられる。レプトン成分を正確に測定するためには、数100 keVでのシンクロトロン成分の折れ曲がりからジェットで加速された電子の最高到達エネルギーを知る必要があるが、現在稼働中の検出器の感度ではX線帯域でのシンクロトロン放射の有意な検出はできていない。またGeV、TeV帯域での検出は1例のみである。

そこで次世代の高感度観測を実現するため、2015年打ち上げ予定のASTRO-H衛星搭載の軟ガンマ線検出器と次世代ガンマ線天文台CTA計画における望遠鏡の開発を行ってきた。さらに同時にASTRO-H衛星に搭載される硬X線検出器による広帯域観測により、軟X線帯域で降着円盤の状態をとらえるとともに軟ガンマ線観測により電子起源の成分の分離が可能となる。

バリオン成分エネルギー測定の見出し方法としては陽子衝突に伴う $\pi^0$ 崩壊ガンマ線を用いることができる。これまで恒星質量ブラックホールからのガンマ線観測例はないものの、CTAによる10倍以上の高感度観測により検出が期待できる(e. g. Romero et al. 2003)。

さらに噴出するバリオンプラズマの速度を直接測定する方法として、赤方と青方にド

ップラーシフトした輝線が観測されている(e.g. Kotani et al. 1994)。これは降着円盤と垂直に双極に噴き出すジェット中のイオンを起源とすると考えられている。ASTRO-H衛星に搭載される超高精密X線分光器は従来の10倍以上のエネルギー分解能をもちバリオンプラズマの噴出速度を高い精度で測定することが可能になる。

### 3. 研究の方法

本研究ではASTRO-H衛星「ひとみ」による観測に重点をおき、「ひとみ」を用いたジェットのバリオン成分の噴出速度を精密測定し、また電子の加速限界を測定することで、プラズマ組成ごとのエネルギー分配の変動を降着円盤の状態ごとに観測し噴出機構に制限を与えることを目的とする。

「ひとみ」に搭載され、X線マイクロカロリメータSXSのもつ7 eV以下のエネルギー分解能を活かし、ジェット中のイオンから放射される輝線成分のドップラーシフトからハドロンジェットの速度を測定する。

まずSXSのX線観測データの較正を行い、性能を最適化する。ブラックホール天体の観測から、降着円盤のスペクトル変動を抽出し、それに伴うハドロンジェットの速度変化を定量化する。

### 4. 研究成果

「ひとみ」の開発試験、打ち上げに携わるとともに、軌道上におけるSXSの運用を行い、世界で初めてX線マイクロカロリメータによる天体観測を実現した。軌道上でのエネルギー分解能は4.9 eVと要求を上回る性能を発揮した。

またSXSは秀でたエネルギー分解能のみならず最小5  $\mu$ sという優れた時間分解能をもつ。本研究では軌道上におけるSXSの時刻較正を主導し、かに星雲中の中性子星パルサーから発せられるX線の周期信号を用いた較正観測を行った。その結果、典型的なX線のパルスプロファイルを得ることに成功し(図1)、また50  $\mu$ s以下の優れた相対時刻精度をもつことを示した。さらにSXS以外の搭載検出器の時刻性能も含め、「ひとみ」全体の時刻較正論文を準備中である。

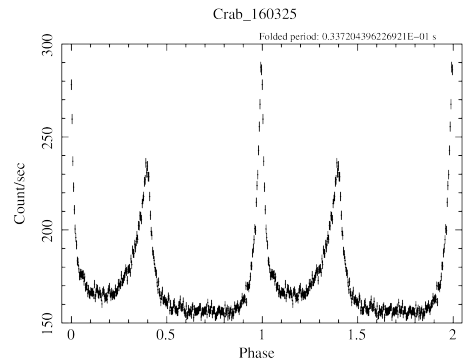


図1: ひとみ SXS で観測されたかに星雲パルサーのパルスプロファイル

残念ながら 2016 年 3 月に衛星を喪失し、本研究で計画していたブラックホール天体の観測を行うには至らなかったものの、中性子星パルサーの電波望遠鏡との同時観測を実施し、上記で示した時刻性能を活かし、Giant Radio Pulse と呼ばれる原因不明の電波パルスの増光現象に対する X 線帯域での変動の上限値を与えることができた。

また、代替として X 線衛星の観測データアーカイブを用いた系統的なブラックホール天体の解析を進めている。

これにともない、すざく衛星における X 線時刻精度劣化を発見した。すざく衛星に搭載された硬 X 線検出器の時刻精度は平常時では 360  $\mu$ s 以下であることが分かっているが (Terada et al. 2008)、2014 年以降では最大 250 ms のとびがあることが分かった。

原因として地上の受信設備の時刻決定にバグがあることを突き止め、改修へと導いた。加えて、時刻精度の劣化した「すざく」の観測データについて補正を施すことで、時刻精度を 1 ms 程度まで改善できることを示した( 図

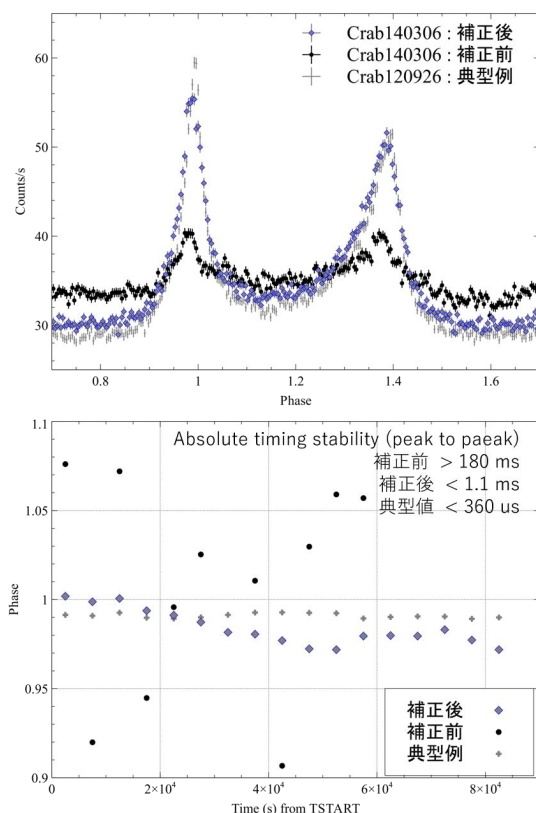


図 2: (上) すざく衛星によって観測されたかに星雲パルサーの畳み込みパルス波形。横軸はパルス周期約 33 ms を 1 phase とする。黒丸: 時刻ずれの影響を受けた 2014 年 3 月の観測データ(補正前)、灰菱: 時刻補正を行った結果、灰十字: 正常に時刻付けが行われている場合の典型例。(2012 年 9 月における観測)  
(下) 左図のデータをそれぞれ 5 ks 毎に分割してパルスピーク位置の変化をプロットしたもの

2)。この結果は該当するすざくの全データに適用され、最終プロダクトとして公開されている。

## 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 5 件)

[1] F. Acero, R. Aloisio, ... A. Bamba, H. Katagiri, S. Koyama, T. Nakamori, H. Sano, Y. Terada, M. Teshima, R. Yamasaki ... (382 名中 169 番目 372 名省略; ABC 順)

「Prospects for CTA observations of the young SNR RX J1713.7-3946」

『The Astrophysical Journal』Volume 840, Number 2, article id. 74, 14pp (2017)

[2] Hitomi Collaboration; Aharonian, F. A.; ... Akamatsu, H.; ... Ezoe, Y.; Kilbourne, C. A.; Koyama, S.; Markevitch, M.; Mitsuda, K.; Ohashi, T.; Takahashi, T.; Tamura, T.; Terada, Y.; Yamasaki, N. ... (217 名中 84 番目 205 名省略; ABC 順)

「Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster」

『The Astrophysical Journal Letters』Volume 837, Issue 1, article id. L15, 9 pp. (2017)

[3] Hitomi Collaboration; Aharonian, F. A.; ... Ezoe, Y.; Fabian, A. C.; Kelley, R.; Koyama, S.; Matsushita, K.; Mitsuda, K.; T.; Petre, R.; Takahashi, T.; Tamura, T.; Terada, Y.; Yamasaki, N. ... (215 名中 82 番目 203 名省略; ABC 順)

「The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster」

『Nature』Volume 535, Issue 7610, pp. 117-121 (2016)

[4] M. A. Leutenegger (以降 ABC 順); M. E. Eckart; Y. Ishisaki; C. A. Kilbourne; S. Koyama; T. Okajima; F. S. Porter; Y. Maeda; K. Sato; M. Sawada, H. Seta; M. Tsujimoto (47 名中 19 番目 35 名省略)

「In-flight verification of the calibration and performance of the ASTRO-H (Hitomi) Soft X-Ray Spectrometer」

『Proc. SPIE 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016』99053U (2016)

[5] Y. Ishisaki, S. Yamada; H. Seta; M. S. Tashiro; S. Takeda; M. Tsujimoto; S. Koyama; M. Sawada; M. A. Leutenegger; M. E. Eckart; F. S. Porter; C. A. Kilbourne (19 名中 9 番目 12 名省略)

「In-flight performance of pulse processing system of the ASTRO-H soft x-ray spectrometer」

『Proc. SPIE 9905, Space Telescopes and

Instrumentation 2016』 99053T (2016)

〔学会発表〕(計2件)

[1] **S. Koyama** behalf of Hitomi SXS team  
「In-Orbit Timing Calibration of SXS」  
『12th IACEHCmeeting』 March 2017, CA, USA

[2] **小山志勇**, ... 寺田幸功, 辻本匡弘, 石崎欣尚, 山田真也, 澤田真理, 藤本龍一, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, 他 ASTRO-H SXS チーム, 寺澤敏夫, 榎戸輝揚 (22名中1番目 11名省略)

「「ひとみ (ASTRO-H)」搭載 精密軟X線分光装置(SXS)の軌道上における Crab Pulsar を用いた時刻較正」

『日本天文学会 2016 年秋季年会』 2016 年 9 月 愛媛大学

〔その他〕

ホームページ等

アウトリーチ活動

平成28年10月 一般向け講演

長野県上田地域広域連合 上田創造館

第19回「星に親しむ夕べ」天文講演会

(<http://astro-h.isas.jaxa.jp/info/2686/>)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小山 志勇 (KOYAMA, Shu)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・

プロジェクト研究員

研究者番号：80758186