

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 30 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740120

研究課題名(和文) 高感度の全天エックス線監視による巨大バイナリブラックホールの探査

研究課題名(英文) Search for supermassive binary black holes,
through high-sensitivity all-sky X-ray survey.

研究代表者

磯部 直樹 (ISOBE NAOKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・研究員

研究者番号：80360725

研究成果の概要(和文)：

我々は、全天 X 線監視装置 MAXI を用いて、中心に二つの超巨大ブラックホール(BH)を持つ活動銀河である巨大バイナリ BH の探査を行った。巨大バイナリ BH は、超巨大 BH の形成に BH 同士の合体が重要な役割を果たすことを示す天体である。我々は、MAXI で検出した約 100 個の活動銀河を対象に、BH 同士のケプラー回転によって生じる周期的な X 線光度変動の検出を行ったが、巨大バイナリ BH は発見できなかった。この結果は、巨大 BH の合体進化の理論に重要な制限を与える。

研究成果の概要(英文)：

Using the Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI), we searched for a binary black hole system, which is an active galaxy hosting two supermassive black holes at its center. A binary black hole system provides one of the important evidence that a supermassive black hole grows through a merger between two black holes. We tried to probe an X-ray periodicity due to the Keplerian motion of the two black holes, from about 100 active galaxies detected with MAXI. However, we have failed to discover a supermassive binary black hole system. This result will put an important constraint on the theory of the black hole evolution through mergers.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：X 線 γ 線天文学

1. 研究開始当初の背景

ほぼ全ての銀河の中心に、太陽質量(M_{\odot})の $10^6 - 10^9$ 倍の超巨大ブラックホール(BH)が存在するという事実は、もはや天文学の常識である。しかし、超巨大 BH の形成過程は現

代天文学の重要な未解決問題である。

BH がその質量を増す過程には、主に質量降着と BH 同士の合体が考えられる。このうち質量降着については、主に銀河系内の恒星質量 BH を対象に観測的にも理論的にも研究

がかなり発展してきた。そして、それらの研究の AGN への適応も進んでいる。

一方、BH の合体成長に関する観測的な研究はほとんど進んでいなかった。しかし、銀河が合体を繰り返して進化することは、観測的にも幅広く知られており、銀河中心の超巨大 BH もそれに伴う合体によって成長すると考えるのはごく自然である。実際、銀河と中心の超巨大 BH の共進化を示唆する観測事実 (Greene et al. 2006 など) や、X 線観測の発展による質量 (数 $10\text{--}1000$) M_{\odot} を持つ注質量 BH の発見 (Matsumoto et al. 2001) などにより、合体によって恒星質量 BH は中質量 BH へ、さらには巨大 BH へと進化するという斬新な可能性も、理論的には指摘され始めていた (Ebisuzaki et al. 2001)。したがって、BH の合体進化のより直接的かつ観測的証拠の発見に、大きな期待がかかっていた。

そこで我々が注目したのが、**巨大バイナリ BH** である。銀河および中心の超巨大 BH が合体する過程では、近接した連星状態の二つの超巨大 BH をもつ活動銀河が形成されるはずである。このような連星状態の超巨大 BH が巨大バイナリ BH である。巨大バイナリ BH は重力波源の可能性も指摘されており、一般相対論検証の候補天体としても非常に重要である。

実際、電波観測などにより巨大バイナリ BH の存在の一端 (Sudou et al. 2003) が見え始めてはいた。しかし、それらを否定する観測事実 (Jenet et al. 2004) も報告されており、巨大バイナリ BH の存在は、観測的には混沌としていた。

2. 研究の目的

巨大バイナリ BH は、二つの BH 同士のケプラー回転によって、周期的な高度変動をすることが予想される (Valtonen et al. 2008)。ここで、重い方の BH の質量を M 、軽い方の BH の質量を m 、BH 間の距離を r 、重い方の BH のシュバルツシルド半径を R_g とすると、その周期は

$$T \sim 1 \text{ year } (M / 10^7 M_{\odot}) (r / 1000 R_g)^{1.5} (1+m/M)^{0.5}$$

と表すことができる。

一方、X 線観測が BH とその近傍を探るための最も有効なプローブであることは、天文学では幅広く知られている。そこで我々は、多数の活動銀河の X 線光度を数年以上にわたって長期監視することで、周期的な変動を抽出すれば、効率よくバイナリ BH を検出できる、という着想に至った。

そこで本研究では、全天 X 線監視装置 MAXI の 3 年間以上の観測データをもとに、巨大バイナリ BH を探査し、その存在を観測的に明らかにする。もし発見できなかった場合には、その存在に制限をつけることができる。

3. 研究の方法

本研究の実現には、高感度で多数の活動銀河を定常的に観測できる装置が必須である。それを可能にするのが MAXI である。MAXI は、国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟の第一期の科学ミッションとして、2009 年夏から本格的な観測を開始した。ISS の地球周回に合わせて、MAXI は 90 分ごとにほぼ全天を観測することができる。2–30 keV の帯域で、MAXI はこれまでの全天 X 線監視装置に比べて一桁程度良い感度を持っており、100 個程度の活動銀河を検出できる。そこで、MAXI で検出できるすべての活動銀河の X 線光度曲線をもとに、周期的な変動を抽出することで、巨大バイナリ BH の探査を行った。研究開始時点では (現時点でも)、MAXI は本研究を本格的に遂行できる唯一の観測装置であることを、特筆しておく。

離心率の高い巨大バイナリ BH では、一軌道周期の間の X 線光度変動が 1 桁以上に達する可能性がある (Hayasaki et al. 2008)。一方、円軌道に近い巨大バイナリ BH ほど、その X 線光度の変動幅は小さくなる。したがって、本研究の成功には、MAXI による X 線測光の精度を可能な限り高めることが要求される。そこで、研究期間の前半では、MAXI のキャリブレーションに重点を置いた。特に重要となったのが、非 X 線バックグラウンドのモデル化と点源応答関数 (PSF) の構築であった。MAXI の非 X 線バックグラウンドは、ISS の一軌道周回で 10 倍程度変動する。そこで、ISS の軌道条件と非 X 線バックグラウンドの相関を徹底的に調査し、精度のよいモデル化を実現した (§ 5. の学会発表⑦)。

次に、MAXI 出られた目的の天体の周囲の X 線画像に対して、非 X 線バックグラウンド、X 線バックグラウンド、天体に対応する PSF の 3 成分で fitting を行うことで、目的の天体の X 線フラックスを精度よく求める手法を確立した。そして、MAXI が検出したすべての活動銀河に対して、X 線光度曲線を得ることができた。

最後に、得られた X 線光度曲線に対して、Power Spectrum Density (PSD) を求め、周期性の探査を行った。ここで、天体の方向によっては MAXI では観測できない時期がある。そのような天体の X 線光度曲線を単純に PSD に変換すると、疑似的な周期性を作り出してしまうことがある。そこで、観測条件をとりこんだ MAXI の光度曲線のシミュレーションを行い、疑似的な周期性をできる限り取り除いた (学会発表①, ⑥)。

4. 研究成果

MAXI の観測データの解析に先立ち、巨大バイナリ BH の進化の理論に基づき、MAXI で検

出可能な巨大バイナリ BH の数の推定を行った。その結果、MAXI では数個のバイナリ BH を検出可能であることを示した(Hayasaki et al. 2010; S5 の雑誌論文⑬)

研究初年度には、Mrk 421 と呼ばれるブレーザー天体(ジェットを噴出する活動銀河)の X 線フレアを検出し、全世界に速報することに成功した(Isobe et al. 2010; 雑誌論文⑬)。図 1 に Mrk 421 の MAXI による X 線光度曲線を示した。Mrk 421 の X 線強度が、非常に激しく変動している様子がよくわかる。特に、2010 年 2 月のフレアでは、Mrk 421 が史上最高の X 線光度に達していたことを明らかにした。以上の結果によって、MAXI が活動銀河の X 線光度変動の監視に非常に有効であることが実証できた。

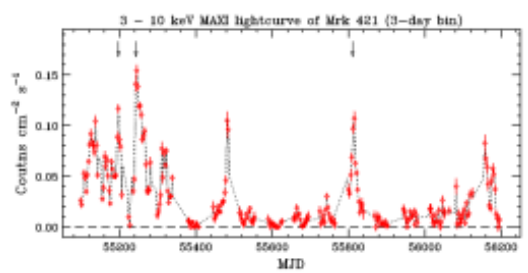


図 1. MAXI が観測したブレーザー Mrk 421 の X 線光度曲線(Isobe et al. 2010, Isobe et al. 2013 in preparation)。MAXI が速報に成功した X 線フレアを矢印で示してある。

また MAXI のフレアの速報は、Mrk 421 の多波長での追観測を誘起することで、様々な副産物を生みだした。我々も、フレアの直後に、大学連携 VLBI (Japanese Very Long Baseline Interferometry) による電波の追観測を組織し、数か月にわたるモニタ観測を行った。その結果、X 線フレアに伴って、Mrk 421 のジェットが新たな Blob を噴出した証拠をとらえることに成功した(Niimura et al. 2013; 雑誌論文②)。

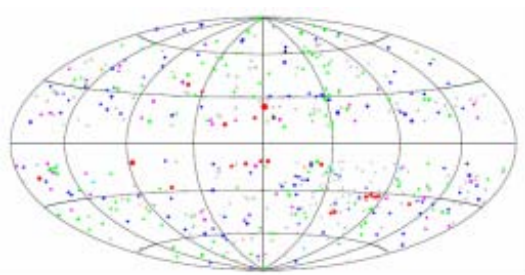


図 2. 2nd MAXI カタログにリストアップした X 線天体を全天図に示した。この中には、100 個以上の活動銀河(紫の●で示した)が含まれている(Hiroi et al. 2013, submitted)。

次に、MAXI の最初の 7 か月の観測データをもとに、MAXI が検出した X 線天体のカタログを作成した(1st MAXI カタログ; Hiroi et al. 2010; 雑誌論文⑦)。さらに、3 年間のデータをもとに、このカタログを改定した(2nd MAXI カタログ; Hiroi et al. 2013 Submitted)。図 2 は、2nd MAXI カタログの X 線源を全天図にプロットしたものである。この 2nd MAXI カタログには、約 100 個の活動銀河がリストアップされている。これらの活動銀河を本研究の最終目的であるバイナリ BH 探査の対象とした。

最後に、MAXI による 3 年間の観測で得られた約 100 個の活動銀河の X 線光度曲線を、PSD へと変換し、周期性の探査を行った。その一例として、図 3. に Mrk 421 の PSD を示す。Mrk 421 の PSD には、変動の周波数 $f = 10^{-8} - 2 \times 10^{-6}$ Hz (変動タイムスケールに換算して 3 年から 1 週間程度)の帯域に、周期的な変動をする成分は含まれていないことが分かった。同じような解析を対象としたすべての活動銀河に対して行ったところ、その中には周期的な変動をする活動銀河は発見できなかった。つまり、MAXI では巨大バイナリ BH を発見できなかった。

すでに述べたとおり、我々は巨大バイナリ BH の進化的理論に基づき、MAXI で数個のバイナリ BH を検出できると予想していた。したがって、MAXI で検出できなかったという事実は、巨大バイナリ BH の進化的理論に何らかの修正が必要であることを示唆しており、理論研究へのインパクトも大きい。

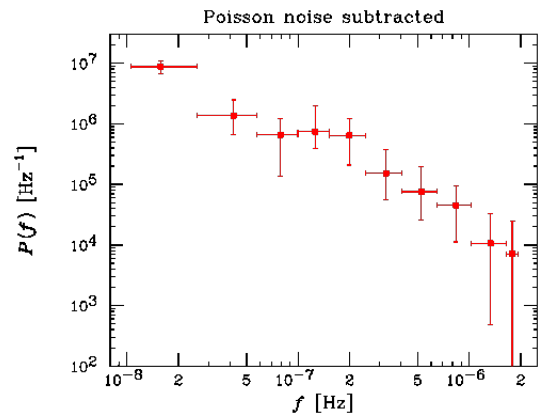


図 3. MAXI による 3 年間の X 線光度曲線から求めた Mrk 421 の PSD を振動数の関数として示した。(Isobe et al. 2013, in preparation; 学会発表①)

最後に、本研究を通じて、巨大バイナリ BH の発見にはより高い検出感度を持つ専用の観測装置が必要であることを痛感した。そこで、我々は、巨大バイナリ BH の探査に特化した超小型衛星 ORBIS を考案した(学会発表②, ④, ⑧)。ORBIS は、軽量コンパクトな X 線

キャピラリレンズを集光系として採用し、X線 CCD と組み合わせることで 1 - 10 keV の X 線を検出する。重量がわずか 50 kg にも満たない超小型軽量の衛星でありながらも、MAXI を凌ぐ感度を備えている。われわれはすでに、ORBIS の基礎設計を行った。

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 13 件)

- ① Isoke Naoki, Kubota Aya, Sato Hiroshi, Mizuno Tsunefumi, “Suzaku Investigation into the Nature of the Nearest Ultraluminous X-Ray Source, M33 X-8”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2012, 64, 119, <http://pasj.asj.or.jp/v64/n6/640119/640119-frame.html>
- ② K. Niinuma, M. Kino, H. Nagai, N. Isoke, K. E. Gabanyai, K. Hada, S. Koyama, K. Asada, T. Oyama, and K. Fujisawa, “Possible Detection of Apparent Superluminal Inward Motion in Markarian 421 after the Giant X-Ray Flare in 2010 February”, Astrophysical Journal, 査読有, 2012, 759, 84, DOI:10.1088/0004-637X/759/2/84
- ③ Usui Ryuichi 他 30 名(10 番目), “Outburst of LS V +44 17 Observed by MAXI and RXTE, and Discovery of a Dip Structure in the Pulse Profile”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2012, 64, 79, <http://pasj.asj.or.jp/v64/n4/640079/640079-frame.html>
- ④ Isoke Naoki, Seta Hiromi, Gandhi Poshak, Tashiro Makoto S., “Suzaku Diagnostics of the Energetics in the Lobes of the Giant Radio Galaxy 3C 35”, Astrophysical Journal, 査読有, 2011, 727, 82, DOI:10.1088/0004-637X/727/2/82
- ⑤ Isoke Naoki, Seta Hiromi, Tashiro Makoto, “Suzaku Measurement of Electron and Magnetic Energy Densities in the East Lobe of the Giant Radio Galaxy DA 240”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2011, 63, S947-S955, <http://pasj.asj.or.jp/v63/sp3/63s341/63s341-frame.html>
- ⑥ Ueda Yoshihiro 他 33 名 (3 番目), “Revisit of Local X-Ray Luminosity Function of Active Galactic Nuclei with the MAXI Extragalactic Survey”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2011, 63, S937-S945, <http://ads.nao.ac.jp/abs/2011PASJ...63S.937U>
- ⑦ Hiroi Kazuo 他 33 名 (3 番目), “The First MAXI/GSC Catalog in the High Galactic-Latitude Sky”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2011, 63, S677-S689, <http://pasj.asj.or.jp/v63/sp3/63s307/63s307-frame.html>
- ⑧ Sugizaki Mutsumi 他 19 名(18 番目), “In-Orbit Performance of MAXI Gas Slit Camera (GSC) on ISS”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2011, 63, S635-S644, <http://pasj.asj.or.jp/v63/sp3/63s302/63s302-frame.html>
- ⑨ Mihara Tatehiro 他 18 名(17 番目), “Gas Slit Camera (GSC) onboard MAXI on ISS”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2011, 63, S623-S634, <http://pasj.asj.or.jp/v63/sp3/63s301/63s301-frame.html>
- ⑩ Isoke Naoki ほか 34 名, “Bright X-Ray Flares from the BL Lac Object Markarian 421, Detected with MAXI in 2010 January and February”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2010, 62, L55-L60, <http://pasj.asj.or.jp/v62/n6/620602/620602-frame.html>
- ⑪ 三原建弘, 中平聡志, 磯部直樹, 全天 X 線監視装置 MAXI (IV) X 線変動天体の報告, 天文月報, 査読無, 2010 年 9 月号, 572-575, http://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2010_103_09/103_572.pdf
- ⑫ Nakahira Satoshi, 他 30 名(15 番目), “MAXI GSC Observations of a Spectral State Transition in the Black Hole Candidate XTE J1752 223”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2010, 62, L27-L32, <http://pasj.asj.or.jp/v62/n5/620501/620501-frame.html>
- ⑬ Hayasaki, Kimitake, Ueda, Yoshihiro, Isoke, Naoki, “Mass Function of Binary Massive Black Holes in Active Galactic Nuclei”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有,

62, 1351-1360,
http://pasj.asj.or.jp/v62/n5/620532/
620532-frame.html

[学会発表] (計 15 件)

- ① 佐藤良祐, 上田佳宏, 廣井和雄, 林田将明, 志達めぐみ, 川室太希, 磯部直樹, 三原建弘, 杉本樹梨, 上野史郎, 河合誠之, MAXI チーム, “MAXI による AGN の 3 年間の X 線光度変動の調査”, 日本天文学会 2013 年春季年会, 2013 年 3 月 20-23 日, 埼玉大学
- ② 石井亮介, 内田佳秀, 養王田一尚, 若林祐介, 荒井康雄, 川畑諒, 錦沢秀太郎, 増田充宏, 渡邊啓太, 大平健弘, 小黒英樹, 川上翔, 中島研二, 西頭太郎, 佐原宏典, 磯部直樹, 江副祐一郎, 大橋隆哉, “巨大バイナリブラックホール探査のための超小型衛星 ORBIS の提案”, 第 13 回宇宙科学シンポジウム, 2013 年 1 月 8-9 日, 宇宙科学研究所
- ③ Naoki Isobe, “Search for an X-ray periodicity from active galactic nuclei, as a signature of a super massive binary black hole system”, Binary Black Holes & Dual AGN: A Workshop in Memory of David S. De Young, 2012 年 11 月 29-30 日, Tucson, Arizona
- ④ 磯部直樹, 増田充宏, 養王田一尚, 若林祐介, 佐原宏典, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 幸村孝由, ORBIS チーム, “巨大バイナリブラックホール探査超小型衛星 ORBIS の基礎設計”, 日本天文学会 2012 年秋季年会, 2012 年 9 月 19-21 日, 大分大学 (旦野原キャンパス)
- ⑤ 磯部直樹, 久保田あや, 佐藤宏, 水野恒史, “最も近傍の大光度 X 線源 M33 X-8 の「すざく」による観測”, 日本天文学会 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 19-22 日, 龍谷大学
- ⑥ 佐藤良祐, 上田佳宏, 廣井和雄, 林田将明, 磯部直樹, 上野史郎, 三原建弘, 河合誠之, MAXI チーム, “MAXI による AGN の X 線光度変動の調査”, 日本天文学会 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 19-22 日, 龍谷大学
- ⑦ 志達めぐみ, 上田佳宏, 磯部直樹, 林田将明, 廣井和雄, 戸泉貴裕, 河合誠之, 森井幹雄, 小浜光洋, 三原建弘, 杉崎睦, 中平聡志, MAXI チーム “MAXI/GSC の非 X 線バックグラウンドの性質とモデル化”, 日本天文学会 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 19-22 日, 龍谷大学
- ⑧ 磯部直樹, 花田行弥, 浅沼匡, 岡野仁庸, 杉山透, 鈴木信義, 佐原宏典, 大橋隆哉, 江副祐一郎, 養王田一尚, ORBIS チーム, “巨大バイナリブラックホール探査小型衛星 ORBIS の開発”, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 19-22 日, 鹿児島大学
- ⑨ 磯部直樹, 瀬田裕美, 田代信, Poshak Gandhi, 松田桂子, “巨大電波銀河の X 線観測で探るジェット活動の進化”, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 19-22 日, 鹿児島大学
- ⑩ Isobe Naoki, “Evolution of the jet energetics revealed with the Suzaku observations of giant radio galaxies”, Suzaku 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond, 2011 年 7 月 22 日, Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, CA, United States
- ⑪ 花田行弥, 浅沼匡, 岡野仁庸, 杉山透, 鈴木信義, 佐原宏典, 大橋隆哉, 江副祐一郎, 磯部直樹(登壇者), “巨大バイナリブラックホール探査小型衛星 ORBIS”, 日本天文学会 2011 年春季年会, 2011 年 3 月 16-19 日, 筑波大学
- ⑫ Naoki Isobe, “Longterm X-ray observation of Blazars with MAXI” (招待講演), Towards a root of AGN Jets: Recent progress, 2010 年 12 月 14-15 日, 国立天文台
- ⑬ Naoki Isobe, “MAXI observation of Blazars”, The first year of MAXI: Monitoring variable X-ray sources -4th International MAXI Workshop-, 2010 年 11 月 30 日-12 月 2 日, 青山学院大学
- ⑭ Naoki Isobe, “Longterm X-ray observations of blazars with MAXI”, IAU Symposium 275: Jets at all Scales, 2010 年 9 月 13-17 日, Buenos Aires, Argentina
- ⑮ 磯部直樹, “X 線観測でわかるブラックホールの物理” (招待講演), 2010 年度第 40 回天文・天体物理若手夏の学校コンパクトオブジェクト分科会, 2010 年 8 月 2-5 日, ホテル日航豊橋

6. 研究組織

(1) 研究代表者

磯部直樹 (ISOBE NAOKI),
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・研究員
研究者番号: 80360727

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし