

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：11302

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25707012

研究課題名(和文) ブラックホールへのガス降着現象の詳細観測のための近赤外線モニター観測体制の構築

研究課題名(英文) Monitoring observation of near-infrared flares from supermassive black hole caused by gas accretion

研究代表者

西山 正吾 (Nishiyama, Shogo)

宮城教育大学・教育学部・准教授

研究者番号：20377948

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,500,000円

研究成果の概要(和文)： ガス雲降着に起因する巨大ブラックホールの赤外線フレア現象を観測するために、南アフリカにあるIRSF望遠鏡を用いて近赤外線モニター観測を行った。2013年にガス雲がブラックホールに最接近し、それに伴う突発現象が期待されたが、私たちの観測では、明確な増光を検出できなかった。2013-2015年間のモニター期間中、ブラックホールはKバンドで12等より明るくなることはなかった。この結果は、電波やX線の観測結果とも一致している。

その一方、モニター観測のデータを用いて、銀河系の中心7分角の領域に存在する変光星の探査を行った。その結果、ミラ型変光星10天体と、セファイド型変光星を1天体発見した。

研究成果の概要(英文)： We have carried out near-infrared monitoring observations of the Galactic supermassive black hole, using the IRSF telescope in South Africa. The closest approach of a gas cloud to the supermassive black hole was in around March/April 2013, and flares from the black hole was expected. However, during our monitoring from 2013 to 2015, no clear flaring was detected. The K-band magnitudes of the black hole are fainter than 12 during the period. Our result is consistent with other monitoring observations in radio and X-ray wavelengths.

Using the same data sets, we have searched for variable stars in the central 7 arcmin region of our Galaxy. We have found new variable star candidates: 10 Mira variable stars, and one Cepheid variable. They are previously unknown variable stars.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：赤外線天文学 ブラックホール 銀河系 銀河中心核

1. 研究開始当初の背景

2011 年末、銀河系の中心にある巨大ブラックホール (supermassive black hole、以下 SMBH) の近傍に、ガス雲らしき天体が発見された。数年かけて SMBH に近づいている様子も観測された。その軌道から、SMBH から 180 天文単位まで近づくと予想された。最接近時期の予想は、2013 年前半である。

もしこの天体が本当にガス雲なのであれば、SMBH に近づくと、強い重力によって引きちぎられ、一部が SMBH に吸い込まれる。その場合、ガスは SMBH に近づくとつれ高温になり、強い放射を発する。また、SMBH は高温のプラズマに囲まれていると考えられている。ガス雲がそのプラズマと衝突し、明るくなるという予想もあった。このように、2012 年から数年間にわたり、ガスが SMBH に吸い込まれる現象をリアルタイムで観測できる機会が得られると期待された。

2. 研究の目的

SMBH にガスが降着する現象を観測するためには、まずそれがいつ起きるのか、知らねばならない。ガス雲が SMBH に最接近する時期は予測できるが、そこからいつ、どのような現象が起きるのか、理論的に予想できない。よって SMBH を高い頻度でモニターし、突発現象が起きたことを確認した後、集中的に観測する、という戦略が必要である。

本研究は、SMBH をモニターするための手法や体制を確立し、集中的な観測につなげることを目的としている。SMBH 間近で起きている現象を観測するためには、大きな望遠鏡が必要である。しかし大きな望遠鏡は様々な研究に用いられ、時間獲得の競争率が高いため、多くとも年に数日-10 日程度しか使えない。よって高頻度のモニターを行うためには、分解能や感度では劣るものの、観測時間を十分に取れる中型望遠鏡が必要となる。

3. 研究の方法

銀河系の中心にある SMBH は、可視光では見えない。銀河系内の星間塵により、散乱や吸収を受けるからである。そのため、電波や赤外線、X 線の観測が必要である。本研究では、高い頻度のモニター観測を行うため、近赤外線による観測を計画した。また、観測時間を多く確保するために、南アフリカにある IRSF 望遠鏡と近赤外線カメラ SIRIUS を使う計画を考えた。

IRSF は 1.4m の赤外線望遠鏡である。南アフリカ共和国のサザerland に設置されており、銀河系の中心がほぼ天頂を通過するという、SMBH の観測に適した場所にある。また近赤外線カメラ SIRIUS は、近赤外線の 3 つの波長帯 (J バンド: $1.2 \mu\text{m}$ 、H バンド: $1.6 \mu\text{m}$ 、Ks バンド: $2.2 \mu\text{m}$) で同時に観測できるカメ

ラである。1 バンドではなく 2 バンドで同時に増光現象が観測されれば、その信頼度は高まる。これらの装置を用いたモニター計画を準備した。

また、データ解析方法にも工夫した。銀河系の中心は、星が密集した場所である。そのため、多くの天体が重なって見えてしまい、明るさの測定精度が落ちてしまう。そのような環境で SMBH の増光現象を検出するために、通常の測光ではなく、画像同士の差分をとる、という解析方法を採用した。

画像の差分を取ると、理想的には、より小さな増光現象までも検出できるようになる。まず観測条件の良い日のデータを用いて、リファレンス画像を作成しておく。得られたデータの中から SMBH の増光の有無を測定するためには、その日の観測画像から、リファレンス画像を差し引く、という作業を行う。この時、観測条件を合わせるために、リファレンス画像をなまして、その日のデータに合うように調整する。その作業がうまくいけば、画像の差し引きの結果、明るさの変化した天体だけを取り出すことができるはずである。

4. 研究成果

ガス雲が SMBH に最接近すると予想された 2013 年春に向けて、私たちは、2013 年 2 月後半からモニター観測を開始した。SMBH は射手座座にあり、10 月-2 月はほとんど観測できない。そのため、その時期を除いて 3 月から 9 月にかけてモニター観測を行った。それを、2013 年 2 月後半から 2015 年 4 月まで継続した。合計の観測日数は 192 日、観測回数は 1088 回である (図 1)。

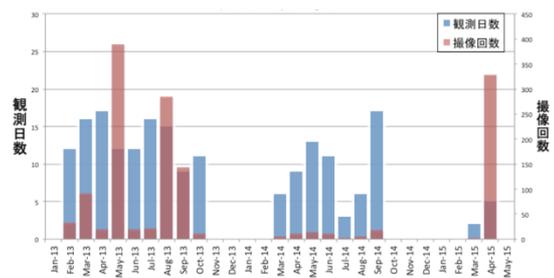


図 1. SMBH の月別観測回数。

研究方法で述べたように、画像の差し引きをすることで、SMBH の増光の有無を調べた。また増光していない場合、その画像における検出限界を検証した。

検出限界は、以下の方法で測定した。まず画像を、シーイング(画像上の星の広がり)ごとに分類する。観測領域には星が密集しているため、検出限界は星像の広がり大きく依存するからである。次に、各画像上で、星の明るさ分布のモデル (point spread function) を作成した。ほとんどの時間で、SMBH の増光

現象は起きていないという仮定のもと、SMBHの位置に星像モデルを埋め込み、それが検出可能かどうか調べるシミュレーションを行った。同じ画像に対して、様々な明るさのモデルを埋め込み、差分法を用いて、有意に検出できるかどうかを調べる。その結果、ある画像に対する検出限界が算出できる。

図2に、シミュレーションの例を示す。横軸は埋め込んだ星の明るさ(等級)である。縦軸は、埋め込んだ画像を差分法で解析した後、SMBHの位置に残った成分のピーク値である。14等くらいまではほとんど変化しないが、それより明るくなると、差し引き後の画像に、明確な違いがあらわれることがわかる。

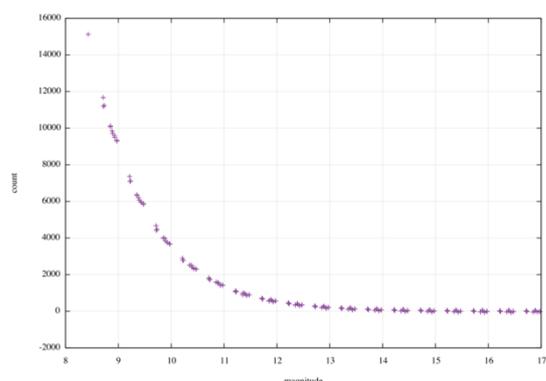


図2: 差し引き後の、SMBHの位置に残った成分のピークカウント値。横軸は埋め込んだ星の等級。

このようなシミュレーションをシーイングごとに行い、検出限界を決定した。まず、星のモデルを埋め込まずに差し引きをした時の、SMBHの位置の明るさの変動を σ とする。また、埋め込んだ星の明るさごとに、差し引き後のピークカウント値のばらつきを求め、それを σ' とする。そしてピークカウント値が、 $3 \times \sqrt{\sigma^2 + \sigma'^2}$ より大きくなる明るさを検出限界と定義した。

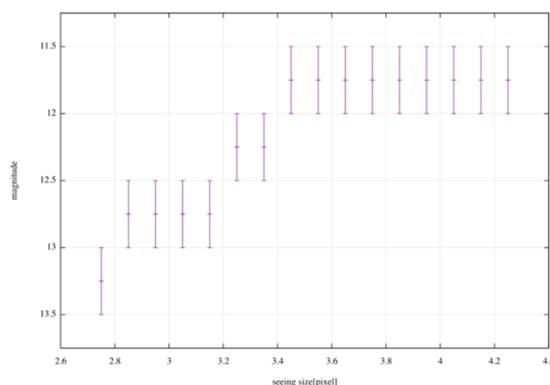


図3: シーイング(横軸)と限界等級(縦軸)との関係。シーイングが良いときは13.3等、悪い時には11.8等と、1.5等程度の差があることがわかる。

図3に、シーイングと限界等級の関係を示

す。横軸がシーイング[pixel]、縦軸が限界等級である。シーイングが大きくなるほど、限界等級が小さい、つまり明るい天体でなければ検出できなくなることがわかる。

この限界等級を用いて、SMBHの位置の差し引き後の明るさが、検出限界を超えたかどうかを調べた。その結果が図4である。横軸は観測データを時間順に並べて与えた観測番号である。縦軸は、差し引き後のSMBHの位置のカウント値である。マゼンタはその画像の限界等級に対応するカウント値を、緑はSMBHの位置のカウント値を示す。

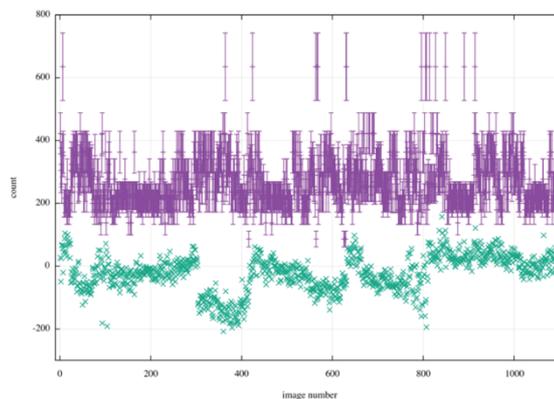


図4: 各観測データにおける検出限界(マゼンタ)と、差し引き後に残ったSMBHの位置の成分のグラフ。横軸は、観測時間順に並べたデータ番号である。縦軸はカウント値である。

図4に見られるように、SMBHの位置の差し引き後の明るさが、限界等級を超えたデータはひとつもなかった。この結果は、IRSF望遠鏡での検出限界より明るくなる現象が、観測期間中には起きなかったことを意味する。また、検出限界の平均は12.5等であった。つまり私たちのモニター観測中、12.5等を超えるような明るい増光現象は見られなかった。

私たちの観測結果は、他の望遠鏡や波長での観測結果と矛盾しない。頻度は低いものの、Very Large TelescopeやKeck望遠鏡による近赤外線観測では、SMBHの増光は確認されていない。また電波やX線の観測でも、大きなフレア現象は報告されていない。これらの結果から、ガス雲の接近による増光現象は起きていない、と考えることができる。

期待していた現象を観測することはできなかったが、私たちが得たデータは、他のサイエンスに有効利用できる。そのひとつとして、変光星の探査を行った。IRSF/SIRIUSの観測では、SMBHを中心に、7分角の視野の画像が得られる。その中には、数万個の星も写っている。この中から、まだ知られていない変光星の探査を行った。

私たちの観測から、ミラ型変光星の候補が新たに10天体見つかった。ミラ型星は、周期

がおおよそ 100 日以上、脈動型変光星である。図 5 に、その一例を示す。図の横軸は変光の位相、縦軸は H バンドの等級である。この星は、周期が約 310 日、振幅が約 0.1 等の明確な変光を示す。

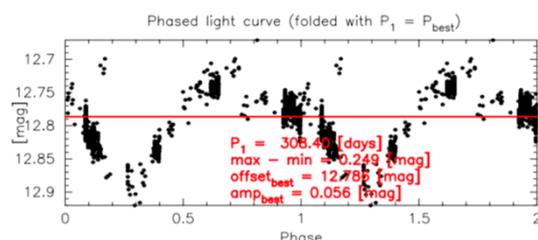


図 5: 新たに発見されたミラ型変光星候補天体の光度曲線。横軸は変光周期の位相、縦軸は星の H バンド等級である。

発見されたミラ型変光星の周期は、100 日から 500 日の間に分布する。その中で、J, H, Ks バンドのうち、2 バンドで検出された天体が 5 つあった。2 バンドのデータがあれば、周期光度関係と、星間減光則を用いて、天体までの距離と減光量を推定することができる。このような計算から、ミラ型星は 6 kpc から 21 kpc の距離に位置し、受けている減光は 2.2 等から 3.2 等 (Ks バンド) であることがわかった。

また、セファイド型変光星の候補を新たにひとつ発見した。セファイド型変光星は、周期が 100 日以下の脈動型変光星である。候補天体の光度曲線を図 6 に示す。周期が約 50 日、振幅が H バンドで約 0.8 等であることがわかる。

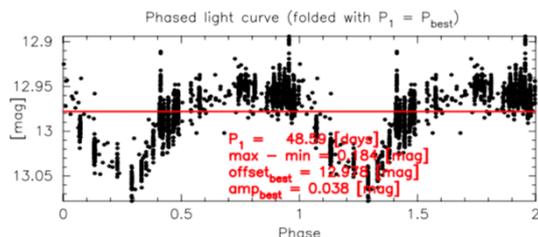


図 6: 新たに発見されたセファイド型変光星候補天体の光度曲線。横軸は変光周期の位相、縦軸は星の H バンド等級である。

セファイド型変光星も、2 バンドのデータがあれば、減光量と距離を求めることができる。この候補天体は、J バンドと H バンドで観測することができた。

ただし、セファイド型変光星にはタイプ I とタイプ II があり、それぞれ周期光度関係が異なる。この天体について二つの周期光度関係を用いて距離や減光量を計算した。その結果、タイプ I だと仮定すると、距離が約 25 kpc、減光量が約 1.3 等 (Ks バンド) と求めた。同様にタイプ II だと仮定すると、距離が約 5.7 kpc、減光量が約 1.3 等 (Ks バンド) であった。距離が 25 pc もあるのに、減光量が 1.3 等と

いうのはあまりに小さすぎる。逆に距離が 5.7 kpc だとすると、1.3 等の減光量は矛盾しない値である。よってこの候補天体は、距離 5.7 kpc にあるタイプ II のセファイド型変光星と判断した。

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 23 件)

- ① E. Aydi, P. Mroz, P. A. Whitelock, S. Mohamed, L. Wyrzykowski, A. Udalski, P. Vaisanen, T. Nagayama, M. Dominik, A. Scholz, H. Onozato, R. E. Williams, S. T. Hodgkin, S. Nishiyama, et al. (他 5 名), V5852 Sgr: an unusual nova possibly associated with the Sagittarius stream, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有り, 461, 2016, 1529 - 1538, DOI: 10.1093/mnras/stw1396
- ② S. Nishiyama, et al. (他 5 名), Spectroscopically identified intermediate age stars at 0.5-3 pc distance from Sagittarius A*, *Astronomy & Astrophysics*, 査読あり, 588, 2016, id.A49, DOI: 10.1051/0004-6361/201322392
- ③ K. Yasui, S. Nishiyama, et al. (他 10 名), Number density distribution of near-infrared sources on a sub-degree scale in the Galactic center: Comparison with the Fe XXV K α line at 6.7 keV, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有り, 67, 2015, id.1237, DOI: 10.1093/pasj/psv100
- ④ J. Kwon, M. Tamura, J. H. Hough, Y. Nakajima, S. Nishiyama, et al. (他 3 名), Wide-field Infrared Polarimetry of the ρ Ophiuchi Cloud Core, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 査読有り, 220, 2015, id.17, DOI: 10.1088/0067-0049/220/1/17
- ⑤ K. Markakis, J. Dierkes, A. Eckart, S. Nishiyama, et al. (他 5 名), SUBARU and e-Merlin observations of NGC3718. Diaries of an SMBH recoil?, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有り, 580, 2015, id.A11, DOI: 10.1051/0004-6361/201425077
- ⑥ S. Nishiyama, H. Hatano, et al. (他

- 2名), Near-infrared Polarimetry and Interstellar Magnetic Fields in the Galactic Center, Highlights of Astronomy, 査読無し, 16, 2015, 387-387, DOI: 10.1088/0004-637X/799/1/46
- ⑦ N. Matsunaga, K. Fukue, R. Yamamoto, N. Kobayashi, L. Inno, K. Genovali, G. Bono, J. Baba, M. S. Fujii, S. Kondo, Y. Ikeda, S. Hamano, S. Nishiyama, et al. (他3名), Kinematics of Classical Cepheids in the Nuclear Stellar Disk, The Astrophysical Journal, 査読有り, 799, 2015, id.46, DOI: 10.1088/0004-637X/799/1/46
- ⑧ A. Feldmeier, N. Neumayer, A. Seth, R. Schodel, N. Lutzgendorf, P. T. de Zeeuw, M. Kissler-Patig, S. Nishiyama, C. J. Walcher, Large scale kinematics and dynamical modelling of the Milky Way nuclear star cluster, Astronomy and Astrophysics, 査読有り, 570, 2014, id.A2, DOI: 10.1051/0004-6361/201423777
- ⑨ S. Nishiyama, K. Yasui, et al. (他4名), The Origin of the Galactic Center Diffuse X-ray Emission Investigated by Near-infrared Observations, Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, 査読無し, 1, 2014, 8-11, http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/SuzakuMAXI2014/pdf/2014SM_conf_P8-11.pdf
- ⑩ T. Yoshikawa, S. Nishiyama, M. Tamura, J. Kwon, T. Nagata, Young Stellar Object Search toward the Boundary of the Central Molecular Zone with Near-infrared Polarimetry, The Astrophysical Journal Supplement, 査読有り, 213, 2014, id.22, DOI: 10.1088/0067-0049/213/2/22
- ⑪ R. Schodel, A. Feldmeier, D. Kunneriath, S. Stolovy, N. Neumayer, P. Amaro-Seoane, S. Nishiyama, Surface Brightness Profile of the Milky Way's Nuclear Star Cluster, Astronomy & Astrophysics, 査読あり, 566, 2014, id.A47, DOI: 10.1051/0004-6361/201423481
- ⑫ S. Nishiyama, K. Yasui, et al. (他4名), The origin of the Galactic center diffuse X-ray emission investigated by near-infrared imaging and polarimetric observations, Proceedings of the International Astronomical Union, 査読無し, 303, 2014, 449-453, DOI: 10.1017/S1743921314001112
- ⑬ S. Nishiyama, et al. (他11人), Magnetically Confined Interstellar Hot Plasma in the Nuclear Bulge of Our Galaxy, The Astrophysical Journal Letters, 査読有り, 769, 2013, id.L28, DOI: 10.1088/2041-8205/769/2/L28
- ⑭ H. Hatano, S. Nishiyama, et al. (他11人), The Efficiency and Wavelength Dependence of Near-infrared Interstellar Polarization toward the Galactic Center, The Astronomical Journal, 査読有り, 145, 2013, id.105, DOI: 10.1088/0004-6256/145/4/105
- ⑮ T. Yoshikawa, S. Nishiyama, et al. (他3名), Intrinsically Polarized Stars and Implication for Star Formation in the Central Parsec of Our Galaxy, The Astrophysical Journal, 査読有り, 778, 2013, id.92, DOI: 10.1088/0004-637X/778/2/92
- [学会発表] (計 33件)
- ① Shogo Nishiyama, The universality of the interstellar extinction law in our Galaxy, Workshop on Studies on variable stars and extinction law in the Milky Way and nearby galaxies, 2017年3月27日 - 28日, 東京大学(東京都・文京区)
- ② Shogo Nishiyama, Near-infrared Polarimetric Survey of the Central Region of Our Galaxy, 2nd CORE-U Conference: Cosmic Polarimetry from Micro to Macro Scales, 2017年2月17日 - 2017年2月18日、広島大学(広島県・東広島市)
- ③ Shogo Nishiyama, Interstellar Extinction Laws from Optical to Infrared Wavelengths in the Galaxy, Astronomical Distance Determination in the Space Age, 2016年5月23日 - 2016年5月27日,

International Space Science
Institute Beijing, Beijing (China)

- ④ 西山正吾、長田哲也、長友竣、田村元秀、銀河系中心における拡散 X 線放射と星数密度分布との違いについて、日本天文学会秋季年会、2015 年 9 月 9 日 - 2015 年 9 月 11 日、甲南大学(兵庫県・神戸市)
- ⑤ 西山正吾、長友竣、安井一樹、長田哲也、義川達人、田村元秀、内山秀樹、近赤外線観測で探る銀河系中心領域の拡散 X 線放射の起源、天の川銀河研究会 2015、2015 年 3 月 23 日 - 2015 年 3 月 24 日、東京大学(東京都・文京区)
- ⑥ 西山正吾、近赤外線による銀河系中心ブラックホール近傍の観測、第 8 回ブラックホール磁気圏研究会、2015 年 3 月 2 日 - 2015 年 3 月 4 日、広島大学(広島県・東広島市)
- ⑦ 西山正吾、星の偏光観測による銀河系磁場構造の測定、宇宙磁場」2014、2014 年 11 月 13 日 - 2014 年 11 月 14 日、国立天文台(東京都・三鷹市)
- ⑧ 西山正吾、銀河中心の赤外線観測、Sgr A*周りの恒星、ガス雲 G2 の運動、長野ブラックホール天文教育研究会、2014 年 11 月 15 日 - 2014 年 11 月 16 日、二澤旅館(長野県・長野市)
- ⑨ 西山正吾、銀河系の中心で起きる不思議な現象、日本物理教育学会東北支部総会、2014 年 6 月 28 日 - 2014 年 6 月 28 日、宮城教育大学(宮城県仙台市)
- ⑩ 西山正吾、銀河系中心だからこそできるブラックホール近傍のサイエンス、活動銀河核ワークショップ ~2020 年代への展望~、2014 年 4 月 23 日 - 2014 年 4 月 24 日、国立天文台(東京都・三鷹市)
- ⑪ 西山正吾、銀河系 Nuclear Star Cluster に広く分布する年齢 50-500Myr の星、日本天文学会春期年会、2014 年 3 月 19 日 - 2014 年 3 月 22 日、国際基督教大学(東京都・三鷹市)
- ⑫ Shogo Nishiyama, The Origin of the Galactic Center Diffuse X-ray Emission Investigated by Nearinfrared Observations, Suzaku-MAXI 2014, Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, 2014 年 2 月 19 日 - 2014 年 2 月 22 日、愛媛大学(愛媛

県・松山市)

- ⑬ Shogo Nishiyama, Large Scale Magnetic Field Configuration in the Galactic Center, The Galactic Center Black Hole Laboratory, 2013 年 11 月 19 日 - 2013 年 11 月 21 日, Instituto des Astrofisica de Andalusia, Granada (Spain)
- ⑭ Shogo Nishiyama, Probing Space-time Structure near Massive Black Hole with Orbiting Stars, Astronomy in the TMT Era, 2013 年 10 月 16 日 - 2013 年 10 月 17 日, Fukuracia Tokyo Station (東京都・千代田区)
- ⑮ Shogo Nishiyama, The origin of the Galactic center diffuse X-ray emission investigated by near-infrared imaging and polarimetric observations, The Galactic Center: Feeding and Feedback in a Normal Galactic Nucleus, 2013 年 9 月 30 日 - 2013 年 10 月 4 日, La Fonda on the Plaza, Santa Fe (USA)
- ⑯ 西山正吾、近赤外線観測で探る銀河系中心拡散 X 線放射の起源、日本天文学会秋季年会、2013 年 09 月 10 日 - 2013 年 9 月 12 日、東北大学(宮城県・仙台市)
- ⑰ Shogo Nishiyama, Observations of the Galactic center with Subaru/GLAO, Subaru Ground Layer A0 Science Workshop, 2013 年 6 月 13 日 - 2013 年 6 月 14 日、北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑱ 西山正吾、近赤外線観測で探る銀河系中心拡散 X 線放射の起源、銀河系中心部ワークショップ 2013、2013 年 6 月 3 日 - 2013 年 6 月 3 日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西山 正吾 (NISHIYAMA, Shogo)
宮城教育大学・教育学部・准教授
研究者番号：20377948

(4) 研究協力者

岩松 篤史 (IWAMATSU, Atsushi)
川俣 育幹 (KAWAMATA, Ikumi)
小野里 宏樹 (ONOZATO, Hiroki)
安達 璃奈 (ADACHI, Rina)
関 愛美 (SEKI, Megumi)