

令和元年6月24日現在

機関番号：11302

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13463

研究課題名(和文)ブラックホール近傍のゆがんだ時空の測定を目指した星の高精度視線速度測定法の研究

研究課題名(英文) Study of precise radial velocity measurements of stars orbiting around a supermassive black hole, to investigate space-time structure around the black hole

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、銀河系の中心にある巨大ブラックホールを周回する星の、高精度視線速度測定方法の確立である。このような天体を継続的に観測し、視線速度をモニターすれば、ブラックホールの作り出す重力場や、ブラックホールによる相対論効果を詳細に測定することができる。

本研究では、すばる望遠鏡を用いた視線速度測定方法の検討を行った。赤外線カメラIRCSを用いて毎年、モニター観測を実施した。観測方法、データ解析方法の検討を続け、高い精度で視線速度を測定することが可能となった。2018年の最近点通過時の多数の観測の結果、目標であるブラックホールによる相対論効果の検出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最も重要な本研究の成果は、「巨大ブラックホールによる相対論効果を検出」し、「巨大ブラックホール近傍の強い重力場を記述する重力理論として、一般相対性理論が、ニュートンの重力理論よりも正しいことを定量的に示した」点にある。ブラックホールを周回する星を観測することで、強い重力場の中を動く質点の運動を調べることが可能となった。という、このような重力場は、地球上では再現できない。そのような強い重力場の実験場で、ニュートンの重力理論では説明のできない現象を観測した。その結果、ブラックホール周囲の時空は、ニュートンの重力理論ではなく一般相対性理論によって記述されることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to study how to measure radial velocities of stars orbiting around the supermassive black hole at the center of our Galaxy. Observations of the orbiting stars allow us to investigate the detailed gravitational field around the black hole, and to detect relativistic effects from the black hole.

We have been studied observation and data analysis methods using the Subaru telescope. We have observed one of the orbiting stars every year during this project, using an infrared camera IRCS. It has become possible to measure the radial velocity of the star better than 20 km/s. The star had been frequently monitored in 2018, during its closest approach to the supermassive black hole, and we have succeeded to detect special and general relativistic effects from the supermassive black hole.

研究分野：天文学

キーワード：天文学 ブラックホール 赤外線 分光 相対性理論 星 ドップラー効果

## 1. 研究開始当初の背景

銀河系の中心には、Sgr A\*と呼ばれる天体が存在する。これまでの研究から、この天体は巨大ブラックホールではないかと考えられている。また Sgr A\*を、10年~数100年の周期で周回する星が多数発見されている。そのひとつである S2(もしくは S0-2)と呼ばれる星は、16年で Sgr A\*を周回する。過去の観測によってこの天体の軌道は正確に知られており、2018年に S2が Sgr A\*に最接近することがわかっていた。最近点での Sgr A\*と S2との距離は、約120AUと予想されている。

Sgr A\*を周回する星は、Sgr A\*が作り出す重力場を動く「質点」と考えることができる。最近点でも100AU以上の距離があるので、星が Sgr A\*の潮汐力の影響を受けることはない。つまりこれらの星は、巨大ブラックホール候補天体である Sgr A\*の作り出す重力場を調査するためのプローブとして用いることができる。このプローブの運動を詳細に、長期間モニター観測することによって、重力場の測定に加えて、相対論効果の検出と一般相対論の検証、ブラックホール周辺環境の調査が可能になると考えられていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、巨大ブラックホール候補天体 Sgr A\*を周回する星 S2の観測手法、データ解析手法を確立することにある。特に私たちは、S2の分光観測に着目した。S2は早期型の主系列星(B0V)である。このような星のスペクトルには、水素やヘリウムの吸収線が存在する。観測される吸収線の波長を実験室の値と比較することで、星の視線速度を測定することができる。私たちは S2のスペクトルを継続して観測することで、S2の視線速度の変化を観測し、Sgr A\*の質量や S2の軌道パラメータが決められると考えた。同時に、最近点付近のスペクトルを高い頻度で観測することにより、Sgr A\*による横ドップラー効果や重力赤方偏移を検出し、一般相対論の検証ができると考えた。このような研究は、Sgr A\*がブラックホールかどうかを調査できるだけでなく、強い重力場における一般相対論の検証という、太陽系では不可能な実験が可能になるという利点がある。

## 3. 研究の方法

S2の観測は容易ではない。銀河系の中心方向には、多量の星間塵が存在し、光を吸収・散乱する。この影響を避けて星を観測するためには、可視光ではなく赤外線での観測が必要となる。またこの領域には銀河系で最大の星団(中心核星団)が存在するため、星の密度は非常に高い。その中で一つの星を分離して観測するためには、口径8m以上の望遠鏡と、地球大気のゆらぎの影響を補正する補償光学装置が必要である。そのため私たちは、すばる望遠鏡と近赤外線観測装置 IRCS、補償光学装置 AO188 とレーザーガイド星システム(LGS)を用いて研究を行うことにした。

## 4. 研究成果

すばる望遠鏡を使った S2の最初の観測は、2014年である。本科研費のサポートにより、2015年以降も毎年、継続して観測を続けることができた。これは現在(2019年)も続いている。

まず私たちは、S2の観測方法、データ解析方法の確立を目指した。S2を他の天体から分離するためには、補償光学装置(AO)が必要となる。AOを使う場合、大気ゆらぎを測定するために、可視光で見える星(natural guide star, NGS)を使う方法と、レーザーで作った人工の星(laser guide star, LGS)を使う方法がある。銀河系中心方向には、可視光で明るい星は少ない。そのため、基本的には LGSを用いた観測を行った。ただし、薄い雲がある時には、レーザーの光が妨げられるため、LGSが暗くなってしまう。そのような条件の時や、LGSシステムが不調の時には、NGSを用いた観測を行った。大気状況がよければ、NGSを用いた観測でも S2を分離し、スペクトルを取得できることが分かった(Nishiyama et al. 2018, PASJ)。

観測後、データ解析方法の検討を行った。近赤外線高分散分光観測データの解析では、注意しなければならない点がある。例えば、地球大気の影響をうまく除去しなければならない。大気の影響は、吸収線と輝線の双方で発生する。吸収線は、天体の光の一部を地球大気に存在する分子が吸収することにより発生する。また地球大気には OH分子が存在し、夜間に光を発する(OH夜光)。この光が輝線として見えるので、これを除かなければならない。また波長較正やスペクトルの抜き出し方法など検討課題は多岐に渡った。

慎重に検討した課題のひとつが、波長較正である。通常の場合、観測の前後でトリウムアルゴン(ThAr)ランプを観測する。ランプの光には、多数の輝線が存在する。これらの波長は既知であ

るので、ThAr ランプの輝線を使った波長較正が可能である。

私たちのデータでこの方法を試したところ、波長較正の精度が不十分であることが分かった。ThAr ランプの観測は、観測が始まる前後(夕方もしくは明け方)の時間に行われる。この場合、天体の観測とランプの観測の時間間隔が長い。この間のわずかな環境(温度等)の変化や、望遠鏡/観測装置の姿勢の変化などの影響で、検出器上の波長がわずかに変化していると考えられる。

私たちはこの問題を解決するために、天体と同時に取得できる情報を用いて波長較正を行うことにした。今回の観測では、比較的長時間(5分)の露光を行う。得られたスペクトルには、地球大気の OH 夜光が複数見られる。この輝線の波長も既知であるので、波長較正に使うことができる。この方法であれば、天体の観測と同時に波長較正のデータが取れるので、ThAr ランプの時のような問題は発生しない。この方法を用いることで、より正確な波長較正が可能になった。2014年から2018年の5年間を通した波長較正の精度は、約 5 km/s であった (Nishiyama et al. 2018, PASJ; Saida et al. 2019, submitted)。

このような観測、データ解析を行った上で、S2 の視線速度を測定できるようになった。まず私たちは 2014 年から 2016 年のデータを念入りに解析した上で、その結果を発表した (Nishiyama et al. 2018, PASJ)。この中で、2016 年の視線速度測定精度は 20 km/s を切ることが分かった。

この結果を受けて、私たちはすばる望遠鏡の Intensive program に採択され、多くの観測時間を獲得することができた。Intensive program は通常の観測プログラムと異なり、重点的に配分すべき課題に観測時間を割り当てるプログラムである。S2 は 2018 年に Sgr A\* の最近点に到達し、短時間で大きな視線速度の変動を示す。そのため、最近点通過前後の期間には、高い頻度で観測をする必要があった。私たちの観測提案が受け入れられ、2018 年の前半に、多数の観測機会を割り当ててもらうことができた。

しかしながら 2018 年の観測は、残念な結果に終わった。まずエルニーニョ現象により、2018 年を通してハワイの天候は不順であった。次に、5 月にハワイ島の火山が噴火した。続く地震の影響とその復旧作業で、観測がキャンセルされた。さらに LGS システムの不調により、レーザーの出力が弱くなり、十分な大気ゆらぎの補正ができなかった。このような影響から、視線速度測定に使えるデータを取得できる機会は、予想よりもずっと少なくなってしまった。

2018 年 5 月の時点で、その後の観測不良が予想できたため、すばる望遠鏡単独で研究を進めることを断念した。同じ目的で研究を続けているアメリカのグループに打診し、共同研究を始めることになった。これにより、すばる望遠鏡だけでなく、Keck 望遠鏡、Gemini 望遠鏡(北)、という 3 つの 8-10m 望遠鏡を用いる観測プロジェクトに変わった。

3 つの望遠鏡の観測結果を合わせることで、私たちは、Sgr A\* による相対論効果を検出することができた (Do et al. 2019, submitted)。Sgr A\* の最近点近傍では、予想される視線速度が理論によって異なる。この研究では、ニュートンの重力理論と一般相対論を比較した。この 2 つの理論を比較すると、最近点近傍で約 200 km/s の差が生じる。その差の値は、最近点通過時間付近をピークに、正規分布のような形の時間変動を示す。私たちの測定結果は、ほぼ事前の予想を再現した。2017 年から徐々に差が見え始め、2018 年 5 月にピークがあり、その後徐々に差が小さくなる、という時間変動を観測できた。観測された差は、横ドップラー効果と重力赤方偏移という、二つの相対論効果で説明できる。つまりこの結果は、ブラックホールによる相対論効果の検出に成功したことを意味する。

またこの結果によって、ブラックホール近傍の重力場を記述する理論として、ニュートンの重力理論よりも一般相対論が正しいことを検証した、と言える。一般相対論の検証は、地球上の実験室の実験・人工衛星を用いた実験や、太陽系天体・パルサーなどの観測を通して行われてきた。しかしブラックホール近傍のような強い重力場における検証の例は、非常に限られている。今回の私たちの成果には、ブラックホール近傍の強い重力場における一般相対論の検証、という大きな意義がある。

<引用文献>

S. Nishiyama, et al., “Radial velocity measurements of an orbiting star around Sgr A\*”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 2018, id. 74

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

1. F. Nogueras-Lara, R. Shoedel, H. Dong, et al., (他 10 人, 8 番目) “Star formation history and metallicity in the Galactic inner bulge revealed by red giant branch clump”, Astronomy & Astrophysics, 査読有, 620, 2018, id.A84, DOI: 10.1051/0004-6361/201833518

2. [S. Nishiyama](#), et al., “Radial velocity measurements of an orbiting star around Sgr A\*”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70, 2018, id. 74, DOI: 10.1093/pasj/psy067
3. T. Kotani, M. Tamura, et al., (他 58 人, 24 番目) “The Infrared Doppler (IRD) instrument for the Subaru telescope: instrument description and commissioning results”, Proceedings of SPIE, 査読有, 10702, 2018, id.1070211, DOI: 10.1117/12.2311836
4. N. Matsunaga, G. Bono, X. Chen, R. de Grijs, L. Inno, [S. Nishiyama](#), “Impact of Distance Determinations on Galactic Structure. I. Young and Intermediate-Age Tracers”, Space Science Reviews, 査読有, 214, 2018, id. 74, DOI: 10.1007/s11214-018-0506-5
5. F. Nogueras-Lara, A. T. Gallego-Calvente, H. Dong, et al., (他 9 人, 9 番目) “GALACTICNUCLEUS: A high angular resolution JHKs imaging survey of the Galactic center”, Astronomy & Astrophysics, 査読有, 610, 2018, id.A83, DOI: 10.1051/0004-6361/201732002
6. K. Markakis, A. Eckart, N. Castro, et al., (他 5 人, 6 番目) “High-resolution Observations of Cen A: Yellow and Red Supergiants in a Region of Jet-induced Star Formation?”, The Astrophysical Journal, 査読有, 852, 2018, id. 63, DOI: 10.3847/1538-4357/aa9379
7. C. Eswaraiah, L. Shih-Ping, C. Wen-Ping, et al., (他 10 人, 9 番目) “Understanding the Links among the Magnetic Fields, Filament, Bipolar Bubble, and Star Formation in RCW 57A Using NIR Polarimetry”, The Astrophysical Journal, 査読有, 850, 2017, id. 195, DOI: 10.3847/1538-4357/aa917e
8. [S. Nishiyama](#), et al., “Spectroscopically identified intermediate age stars at 0.5-3 pc distance from Sagittarius A\*”, Astronomy & Astrophysics, 査読有, 588, 2016, id. A49, DOI: 10.1051/0004-6361/201322392
9. N. Matsunaga, M. W. Feast, G. Bono, et al., (他 6 人, 7 番目) “A lack of classical Cepheids in the inner part of the Galactic disc”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 462, 2016, 414-420, DOI: 10.1093/mnras/stw1548
10. E. Aydi, P. Mroz, P. A. Whitelock, et al., (他 16 人, 14 番目) “V5852 Sgr: an unusual nova possibility associated with the Sagittarius stream”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 461, 2016, 1529-1538, DOI: 10.1093/mnras/stw1396
11. K. Markakis, Dierkes, J., Eckart, A., et al., (他 6 人, 4 番目) “Subaru and e-Merlin observations of NGC3718. Diaries of a supermassive black hole recoil?”, Astronomy & Astrophysics, 査読有, 580, 2015, id. A11, DOI: 10.1051/0004-6361/201425077

[学会発表] (計 48 件)

1. 善光哲哉、他、「銀河系面内のセファイドを利用した磁場構造解析」、日本天文学会春季年会、2019 年
2. [西山正吾](#)、他、「銀河系中心巨大 BH を巡る星 S0-2/S2 の研究 3: すばる視線速度モニター観測 2018 の解析状況」、日本天文学会春季年会、2019 年
3. 齊田浩見、「銀河系中心巨大ブラックホールによる一般相対論の検証への挑戦」、2<sup>nd</sup> Mathematics and Physics in General Relativity、2019 年
4. 齊田浩見、「銀河系中心巨大 BH の相対論効果の測定: BH を巡る星から届く光の赤方偏移の時間変動に現れるダブルピーク構造の発見」、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年
5. 齊田浩見、「銀河系中心ブラックホールの相対論効果の見え方」、ブラックホール磁気圏研究会 2019、2019 年
6. [西山正吾](#)、「銀河系中心ブラックホールを周回する星のモニター観測」、天の川銀河バルジ研究会、2019 年
7. [Shogo Nishiyama](#)、「Exploring General Relativistic Effects and Environment of the Galactic SMBH」、Subaru Users’ Meeting FY2018、2019 年
8. Hiromi Saida、「General Relativistic Effect of Galactic Central Massive Black Hole Detected by Subaru」、Subaru Users’ Meeting FY2018、2019 年
9. 齊田浩見、「銀河系中心巨大ブラックホールの重力における一般相対論の検証への挑戦」、理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム、2018 年
10. [西山正吾](#)、「Observations of S0-2/S2 around its closest approach to the Galactic SMBH: Subaru 2018」、ブラックホール地平面勉強会、2018 年
11. Hiromi Saida、「Exploring GR Effects of Super-Massive BH at Galactic Center 1: current status of our project」, The 28<sup>th</sup> workshop on general relativity and gravitation in Japan, 2018 年
12. 齊田浩見、「銀河系中心巨大ブラックホールの一般相対論効果の探査と関連する科学目標」、BZ77 研究会、2018 年
13. 小野里宏樹 (他 12 人, 13 番目)、「IR-TMT と位置天衛星の距離データを用いたレッドクランプ星の絶対等級の決定」、日本天文学会秋季年会、2018 年
14. 大神隆幸、齊田浩見、他、「すばる望遠鏡による大質量銀河中心ブラックホールの相対論効果の調査」、日本天文学会秋季年会、2018 年

15. 齊田浩見、西山正吾、他、「銀河系中心巨大 BH を巡る星 S2 の研究 2: 一般相対論の検証への挑戦」、日本天文学会秋季年会、2018 年
16. 西山正吾、他、「銀河系中心巨大 BH を巡る星 S2 の研究 1: すばる視線速度モニター観測の現状」、日本天文学会秋季年会、2018 年
17. Shogo Nishiyama, “Radial Velocity Measurement of an Orbiting Star Around Supermassive Black Hole in Our Galaxy”, Subaru Users’ Meeting FY2017, 2018 年
18. 西山正吾、「銀河系中心巨大ブラックホール近傍の星の近赤外線観測」、「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第 5 回ワークショップ、2018 年
19. 西山正吾、「銀河系中心領域の赤外線天体」、第 1 回 missing black hole ワークショップ、2017 年
20. 西山正吾、「銀河系中心巨大ブラックホールを周回する星の視線速度モニター観測とサイエンス」、天の川銀河研究会 2017、2017 年
21. 西山正吾、「銀河系の巨大ブラックホールを周回する星 S2 の視線速度モニター観測」、日本天文学会秋季年会、2017 年
22. 西山正吾、「銀河系中心領域の星の運動を使ったサイエンス」、ブラックホール地平面勉強会<銀河系中心と JASMINE>、2017 年
23. 西山正吾、「2018 年、S2 の近ブラックホール点通過に向けて」、ブラックホール地平面勉強会、2017 年
24. 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
25. 小谷隆行 (他 55 人, 50 番目)、「地球型惑星検出のためのすばる赤外線ドップラー分光器 IRD の開発: 12」、日本天文学会春季年会、2017 年
26. 長友竣、他、「銀河系バルジ領域における拡散 X 線強度と近赤外線数面密度の空間分布比較」、日本天文学会春季年会、2017 年
27. 善光哲哉、他、「セファイドを用いた銀河面偏光観測」、日本天文学会春季年会、2017 年
28. 安達璃奈、西山正吾、濱野哲史、「キューサー B1422+231 の近赤外線分光観測による微細構造定数の研究」、第 22 回天体スペクトル研究会、2017 年
29. 五林遙、西山正吾、他、「銀河系中心ブラックホール近傍の星の研究」、第 22 回天体スペクトル研究会、2017 年
30. 西山正吾、齊田浩見、「巨大ブラックホールを周回する星の近赤外線高分散分光観測」、第 22 回天体スペクトル研究会、2017 年
31. Shogo Nishiyama, 「Near-infrared Polarimetric Survey of the Central Region of Our Galaxy」, 2<sup>nd</sup> CORE-U Conference: Cosmic Polarimetry from Micro to Macro Scales, 2017 年
32. Shogo Nishiyama, 「General Relativistic Measurement of Mass of the Galactic Massive Black Hole」, Subaru Users’ Meeting FY2016, 2017 年
33. 西山正吾、齊田浩見、「銀河系中心巨大 BH の一般相対論効果と質量の高精度測定へ向けて: 観測」、「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第 4 回ワークショップ、2016 年
34. 西山正吾、齊田浩見、「RV observations of S2 and GR effects from SMBH」、ブラックホール地平面勉強会、2016 年
35. 杉谷光司、楠根貴成、中村文隆、西山正吾、SIRPOL チーム、「赤外線暗黒星雲「ネッシー」星雲の近赤外線偏光観測」、日本天文学会秋季年会、2016 年
36. 大宮正士 (他 12 人, 13 番目)、「すばる IRD による M 型矮星周りの地球型惑星探索 III: 事前観測」、日本天文学会秋季年会、2016 年
37. 岩松篤史、板良房、西山正吾、「銀河系中心領域に存在する young, intermediate-age stars の起源の探査」、日本天文学会秋季年会、2016 年
38. Shogo Nishiyama, 「Astrometry and Narrow-band Imaging of the Galactic Center with ULTIMATE-Subaru」, ULTIMATE-Subaru Science Workshop 2016, 2016 年
39. 西山正吾、「RV observation of S2 and mass of SMBH」、ブラックホール地平面勉強会、2016 年
40. Shogo Nishiyama, 「Interstellar Extinction Laws from Optical to Infrared Wavelengths in the Galaxy」, Astronomical Distance Determination in the Space Age, 2016 年
41. 西山正吾、「Sgr A\* 近傍の星の観測と SMBH」、ブラックホール地平面勉強会、2016 年
42. 小谷隆行 (他 49 人, 48 番目)、「地球型惑星検出のためのすばる赤外線ドップラー分光器 IRD の開発: 11」、日本天文学会春季年会、2016 年
43. 善光哲哉 他、「ミラ型変光星を用いた銀河系中心の磁場構造の解析」、日本天文学会春季年会、2016 年
44. 西山正吾 他、「銀河系の巨大ブラックホールを周回する星 S2 の視線速度モニター計画」、日本天文学会春季年会、2016 年
45. 西山正吾、「IRD による BH 近傍の相対論効果の検出と微細構造定数」、近赤外高分散分光研究会: 地球型惑星探索と広がるサイエンス、2015 年
46. 西山正吾、「近赤外線観測による銀河系中心領域の磁場構造とブラックホール近傍の研究」、

東北大学天文学教室談話会、2015年

47. 小谷隆行 (他 49人, 48番目)、「地球型惑星検出のためのすばる赤外線ドップラー分光器 IRD の開発: 10」、日本天文学会秋季年会、2015年
48. 西山正吾、「IRSF/SIRIUS とすばる望遠鏡を用いた銀河系中心領域の近赤外線観測」、国立天文台談話会、2015年

〔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

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号 (8桁):

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: 長友 竣

ローマ字氏名: (NAGATOMO, Schun)

研究協力者氏名: 五林 遥

ローマ字氏名: (GORIN, Haruka)

研究協力者氏名: 高橋 美月

ローマ字氏名: (TAKAHASHI, Mizuki)

研究協力者氏名: 岩松 篤史

ローマ字氏名: (IWAMATSU, Atsushi)

研究協力者氏名: 斉田 弘見

ローマ字氏名: (SAIDA, Hiromi)

研究協力者氏名: 善光 哲哉

ローマ字氏名: (ZENKO, Tetsuya)

※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。