

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：54701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800150

研究課題名(和文) Sスターの軌道解析によるいて座Aスターの自転運動の解明

研究課題名(英文) Constraining the spin of Sgr A* via the motion of the S-stars

研究代表者

孝森 洋介 (TAKAMORI, Yohsuke)

和歌山工業高等専門学校・総合教育科・准教授

研究者番号：30613153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：報告者は、2014年から開始されたSスターの1つであるS2のすばる望遠鏡による観測計画に参加している。その結果、すばる望遠鏡を用いてS2の視線速度を高い精度で観測することができた。加えて、いて座Aスターの周囲にある暗い質量がS2の視線速度へおよぼす影響を定量的に示した。この結果、現在の上限値であるいて座Aスターの質量の1%が暗い質量としてある場合、S2がいて座Aスターへ最接近するときにS2の視線速度に対し最大で1000km/sのずれを生じさせることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We have observed the radial velocity of S2, which is one of S-stars, with Subaru telescope since 2014. As a result, we could have determined the radial velocity of S2 with high accuracy thanks to Subaru telescope. In addition, We have calculated the influence on the radial velocity of S2 due to dark masses around Sgr A*. We have found that 1% dark masses of Sgr A*, that is the present upper limit, affect the radial velocity of S2 as at most 1000km/s when S2 goes through pericenter.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：超大質量ブラックホール 天の川銀河 ブラックホールスピン 見えない質量

1. 研究開始当初の背景

(1) 我々の地球が属する銀河は「天の川銀河」の呼称で親しまれている。天の川銀河の中心には電波で輝く天体があり、「いて座 A スター」と呼ばれている。いて座 A スターの周辺には多くの恒星 (S スター) が見つかり、15 年にわたる継続的な観測からいて座 A スターを周回運動していることが明らかになっている。太陽の質量が地球などの惑星の運動から推定できるように、S スターの運動からいて座 A スターの質量が推定できる。その推定によると、いて座 A スターは太陽の質量の約 400 万倍の質量を持つことが分かった。加えて、いて座 A スターの広がり非常に小さく太陽系と同程度ほどであることが電波による観測から示されている。太陽系ほどの広がり、太陽 400 万個分の質量を詰めるといことは、いて座 A スターが超大質量のブラックホールであることを強く示している。現在では、天の川銀河に限らず、ほぼすべての銀河の中心に超大質量ブラックホールがあると考えられている。銀河の中心にあるブラックホールは、銀河が形成された歴史の中で重要な要素であると考えられている。そのため、銀河中心にあるブラックホールの性質を調べ整理することが重要な課題の一つとなっている。

(2) ブラックホールを特徴づけるものは質量と自転の速さ (以下では、スピンとよぶ) である。すでに述べたようにいて座 A スターについては、その質量はほぼ明らかになっている。一方で、スピンのついてはその自転軸の向きも明らかになっていない。我々に一番近い超大質量ブラックホールであるいて座 A スターのスピンを決定することは、銀河の中心にあると言われる超大質量ブラックホールを探るための重要な一歩となると期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、天の川銀河の中心にあるとされる超大質量ブラックホール「いて座 A スター」についてそのスピンの向きと大きさを明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1) いて座 A スターのスピンを明らかにするために本研究では、S スターに着目した。スピンの情報を得る方法はいくつかあるが、S スターの運動から決定することが最もシンプルである。なぜなら、S スターの運動は純粋にいて座 A スターの情報で決まるため、他の物理が入る余地がほぼない。加えて、2018 年には、S スターの内の一つである「S2」と呼ばれる星がいて座 A スターに最接近することが予測されている。この最接近で、S2 は今までより強くいて座 A スターの影響を受けることになる。S2 がいて座 A スターに最接近するのは 16 年に 1 回であり、2018 年における

大きな天文現象の 1 つになる。最接近のときの S2 の観測結果からいて座 A スターのブラックホールとしての情報がこれまで以上に引き出されると期待される。

(2) ブラックホールをあつかうためには、アインシュタインによる一般相対性理論が必要となる。一般相対性理論によると、重力が強くなると星から放たれる光の軌道も曲がってしまう。本研究では、いて座 A スターをカー・ブラックホール (一般相対性理論における回転するブラックホールを表す厳密解) とし、S スターをカー・ブラックホールの周囲を自由運動する質点としてその軌道を理論的に解析する。加えて、S スターから放出される光の軌道も理論的に解析する。星と光の理論計算と S スターの観測データと比較することでいて座 A スターのスピンについて調べる。

(3) 本研究では、まずブラックホール周りの質点・光の軌道をパラメータにより自在に与えられる数値プログラムを開発する。次に、数値プログラムから得た結果と観測データを比較することでいて座 A スターのスピンを明らかにする。この際、スピンの大きさを表すパラメータの領域を広くとることでブラックホール以外の可能性も含めて探る。

4. 研究成果

(1) 「太陽系の惑星」では「ケプラーの法則」が成り立つことが知られている (例えば、第 1 法則は惑星の軌道はだ円になるというもの)。「S スター」についてもケプラーの法則はほぼ成り立つことが知られている。そのため、これまでの S スターの理論計算では主に「ケプラーの法則」を元に行われてきた。ケプラーの法則では、星の軌道はだ円であるため、そのだ円が我々から見てどのように配置されているかを決めればよい。だ円はよく分かっている図形であるため、観測との比較をするときの取り扱いが易しい。一方で、ブラックホールのような強い重力をもつ天体の周囲は一般相対性理論が必要となり、一般相対性理論では、ブラックホールの周囲を運動する星の軌道はだ円ではなくなることが知られている。2018 年に最接近が予想されている S2 では、いて座 A スターブラックホールとしての影響をこれまで以上に強く受けるため、ケプラーの法則からずれることが十分考えられる。だ円という決まった図形がなくなるため、これまでの取り扱い方はできなくなる。理論と観測の比較をやすくするためには、星の軌道を表しやすいパラメータを再構成することが望まれる。報告者は、星の軌道を決めるパラメータについて、観測と比較しやすくするために再構成を行った。その結果、いくつかのパラメータについては、ケプラーの法則のときと同様の扱いをしてよいことが分かった。例えば、だ円の円からの

ひしゃげ方を決める離心率と呼ばれるパラメータは、そのまま使用できる。ブラックホールの影響を考えたとき、軌道はだ円ではなくなるため、一見、離心率は使えなく思える。実際、離心率はだ円を表す量ではなくなるが、星がブラックホールの最も近くを通る点とブラックホールまでの距離と、星がブラックホールの最も遠くを通る点とブラックホールまでの距離の比を与える物理量となり新しい解釈でだ円のとときと同様に軌道を決めるパラメータとして使うことが可能である。

(2) 本研究は、S スターの観測と理論計算とを比較することで、いて座 A スターのブラックホールとしての性質を探るものである。S スターの中でも、S2 と呼ばれる星は、いて座 A スターの最も近くを通る星として知られており、2018 年にいて座 A スターへ最接近することが予測されている。2018 年の S2 の観測データは、いて座 A スターの性質を知るうえで非常に重要である。報告者は、西山正吾准教授（宮城教育大学）を中心とした、斉田浩見准教授（大同大学）、高橋真聡（愛知教育大学）らによる S2 の観測計画に参加した。S2 の観測には大きく 2 通りあり、時々刻々と S2 の位置が変化していく様子をとらえるか、あるいは S2 から放出されている光を観測しその観測から我々から見て S2 がどれくらいの速さで遠ざかっているあるいは近づいているか（視線速度という）を測るかである。位置の変化は欧米グループが精力的に行っている。我々は、S2 から放出されている光を観測することに注目した。特に、いて座 A スターへ最接近する 2018 年では、いて座 A スターからの重力がより強力になるため、S2 の視線速度は大きく変化する。我々は、この変化を詳細にとらえることに挑戦した。S2 からの光を観測する望遠鏡としては、S2 からの光を高精度で観測できるすばる望遠鏡を利用することとした。この観測計画は 2014 年から始まり、2014 年から 2017 年までの観測計画に順調に採択された。

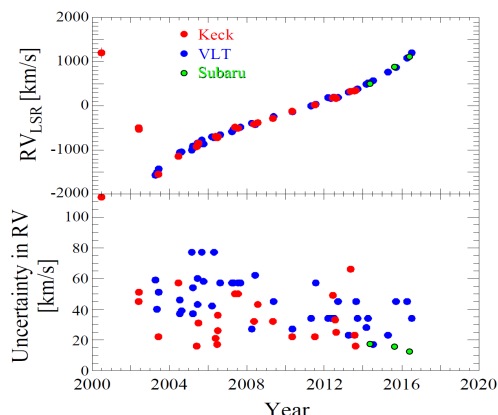


図 1 : すばるによる S2 の観測結果 (緑の点) 上図が観測結果、下図が不確かさを表している
さらに、2018 年前半のすばる共同利用につい

て、通常より多くの望遠鏡利用時間を希望する利用者向けのプログラムに申請し採択された。2014 年から 2016 年までの観測成果は論文にまとめ雑誌に投稿し現在印刷中である[引用文献]。2014 年から 2016 年までの観測では、これまでの欧米グループより小さい不確かさで観測することに成功した(図 1 の下図)。

(3) S スターの運動はいて座 A スターのブラックホールとしての性質でほぼ決まる。それはいて座 A スターと S スターの間はほぼ真空であることを意味しているが、実際は、いて座 A スターの質量に対して 1% 程度の暗く見えない質量が分布していても観測と矛盾はしない。この暗い質量が S スターの軌道におよぼす影響はすでに調べられている。一方、視線速度におよぼす影響については調べられていない。いて座 A スターのスピンを明らかにするためには、このような暗く見えない質量が視線速度にどのような影響をおぼすのかを明らかにしておく必要がある。報告者は、特に S2 に着目し、2018 年の最接近のとき、いて座 A スターと S2 の間にある暗く見えない質量が、S2 の視線速度におよぼす影響を定量的に計算し明らかにした。その結果、暗く見えない質量が、従来の制限であるいて座 A スターの 1% あると、最接近の時期で、これまでの予測から最大 1000km/秒ほどのずれが生じることが分かった[引用文献]。ブラックホールであることの影響による視線速度のずれが 200km/秒ほどであるので、暗く見えない質量の影響は大きい。2018 年の観測で十分とらえられるほどの影響を与えることが分かった。このことから、いて座 A スターのスピンの情報を得るためには、暗く見えない質量の影響を十分考慮し検討しなければならないことが分かった。

<引用文献>

西山正吾 他、Radial Velocity Measurements of an Orbiting Star Around Sgr A*, Publication of the Astronomical Society of Japan、印刷中

孝森 洋介、斉田 浩見、西山 正吾、高橋 真聡、銀河系中心領域の暗い質量分による S2 の視線速度への影響について、2018 年天文学会春季大会講演予稿集、2018、261

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 1 件)

西山 正吾、斉田 浩見、孝森 洋介、高橋 真聡 他、Radial Velocity Measurements of an Orbiting Star Around Sgr A*、Publication of the Astronomical Society

of Japan、査読有、印刷中
URL:<https://arxiv.org/abs/1709.01598>

[学会発表](計3件)

孝森 洋介、銀河系中心天体を S スターの運動から探る、大阪市立大学重力・素粒子研コロキウム、2016 年

孝森 洋介、Constraining the spin of Sgr A* via the motion of the S-stars、Subaru seminar、2016 年

孝森 洋介、齊田 浩見、西山 正吾、高橋 真聡、銀河系中心領域の暗い質量分による S2 の視線速度への影響について、天文学会 2018 年春季大会、2018 年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

孝森 洋介 (TAKAMORI, Yohsuke)
和歌山工業高等専門学校・総合教育科・准教授
研究者番号：30613153

(2) 研究協力者

齊田 浩見 (SAIDA, Hiromi)
大同大学・教養部・准教授
研究者番号：80367648

(3) 研究協力者

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

高橋 真聡 (TAKAHASHI, Masaaki)
愛知教育大学・教育学部・教授
研究者番号：30242895