



大阪科学・大学記者クラブ加盟社各位

2020年4月30日

「ブラックホールの無毛定理」の観測的検証に成功

大阪教育大学・天文学研究室の松本桂准教授を含む、14か国の研究者からなる国際研究グループは、地球から約35億光年の距離に位置する活動銀河核「OJ 287」の継続的な観測から、この銀河の中心部に存在する約180億太陽質量の超巨大ブラックホールにおいて、ブラックホールの無毛定理が成立していることを観測的に検証することに成功しました。

ブラックホールとは、アルベルト・アインシュタイン博士の重力理論である一般相対性理論によって予言された、いかなるものも脱出できない暗黒天体です。そのようなブラックホールの候補とされる天体は、これまでいくつも見つっていますが、実はそれらが一般相対性理論から導かれる「真のブラックホール」であることはこれまで検証されたことがありませんでした。つまり、それらは「ブラックホールに似て非なるなにか」である可能性が常に残されているのです。一般相対性理論の基礎方程式によって記述されるブラックホールであれば、その特徴は、質量、自転、電荷の3つのみで決まり、ブラックホールの個性はそれら以外では区別できないことが示されています。これは「ブラックホールの無毛定理」として知られています。逆に言えば、ブラックホールの候補とされる天体において、ブラックホールの無毛定理が成立していることが示されれば、一般相対性理論の正しさが検証されることになります。しかし、この定理を実際に検証するためには、極めて強大な重力場の存在が必要とされ、現実の宇宙に存在する天体で実証された例はこれまで存在しませんでした。

ブラックホールの無毛定理が成立していることを観測的に検証することに成功したことにより「真のブラックホール」が現実の宇宙に存在していることが、史上初めて明らかとなりました。さらに、同天体がナノヘルツ重力波の放射源であることを示しました。この研究成果は、故スティーブン・ホーキング博士達によるブラックホールに関する先駆的な理論的研究を立証することになりました。

研究成果の詳細については、別添資料をご覧ください。

本研究成果は『The Astrophysical Journal Letter』誌にて公開され、NASAによるプレスリリース（英語）も下記のとおり行われています。

<http://www.spitzer.caltech.edu/news/2271-ssc2020-11-Spitzer-Telescope-Reveals-the-Precise-Timing-of-a-Black-Hole-Dance>



51cm 反射式望遠鏡
(大阪教育大学柏原キャンパス)

研究の背景：真のブラックホールとは？

ブラックホールは、アルベルト・アインシュタイン博士の重力理論である一般相対性理論によって予言される、いかなるものも脱出できない暗黒天体です。たとえば、今から約1年前に、地球規模の電波望遠鏡の干渉計である事象の地平線望遠鏡(Event Horizon Telescope; EHT)によって、楕円銀河 M87 の中心部に存在する超巨大ブラックホールの影と、それを取り囲む光のリングが撮影されたと発表されました。ところで、そこに写っていた M87 のブラックホールとされるものは、本当に一般相対性理論の基礎方程式によって記述される場所の「真のブラックホール」の姿なのでしょうか？ この疑問に答えるには、あの黒い影が「ブラックホールとしての所与の条件を満たしている」ことを知る必要があります。

一般相対性理論に基づくブラックホールは、その個性が質量、自転(角運動量)、電荷の3つのみで決まり、それら以外ではブラックホールは区別できないとする定理が、1960年代後半～1970年代前半にかけてウェルナー・イスラエル博士、ブランドン・カーター博士、そしてスティーブン・ホーキング博士によって提唱されました。この理論的要求は言い換えれば、ブラックホールの表面は完全になめらかである(でこぼこが許されない)ということであり、のちに「ブラックホールの無毛定理(no-hair theorem)」として知られることになりました。これまでに、観測的な根拠からブラックホールだと考えられる候補天体は数多く見つかっていますが、実はそれらが無毛定理を満たした真のブラックホールかどうかについては、これまで検証されたことはありませんでした。つまりそれらは、一般相対性理論の帰結とは異なる「ブラックホールに似て非なるなにか」である可能性も常に残されているのです。逆に言えば、ブラックホールの候補とされる天体において、たしかに無毛定理が成立していることが示されれば、無毛定理の前提となる一般相対性理論の正しさが検証されることとなります。

ブラックホールの無毛定理の観測的検証

この定理の成立はどのように検証されるのでしょうか。それについての実際的な理論が、カリフォルニア工科大学のキップ・ソーン博士(2017年のノーベル物理学賞受賞者)によって1980年に提唱されました。ソーン博士は、ブラックホールを周回する衛星天体の公転軌道を追跡することで、そのブラックホールがでこぼこな構造(あるいは毛)を持っているなら、その軌道に判別可能な影響を及ぼすと提唱しました。しかし、この影響が生じているかどうかを検証可能なレベルで観測するには、極めて強大な重力場の存在が必要とされます。そのような条件は並の天体では実現せず、現実の宇宙に存在する天体で実証された例はこれまでに存在しませんでした。

さて、では我々はそのような重いブラックホールと、それを周回する重い衛星天体のペアを発見すれば良いわけですが、なんとそのような連星系が、OJ 287 という名で知られていた活動銀河中心核に存在することが、フィンランドのトゥルク大学の研究者達によって

1980年代末～1990年代にかけて提唱されました。その衛星天体は、なんということか、やはりブラックホールでした。すなわち OJ 287 の中心核には、宇宙最大級となる約 180 億太陽質量の超巨大ブラックホールが存在し、その周囲を小さい衛星ブラックホール（それでも 1 億 5 千万太陽質量）が公転運動しており、ソーン博士が提唱した強大な重力場におけるブラックホールの無毛定理の検証用天体として利用可能であることが判明したのです（図 1）。その提唱から約 30 年間、OJ 287 の連星ブラックホールの軌道運動は、大阪教育大学（図 2）を含む世界各国の天文台によって詳細に追跡され、一般相対性理論の効果による歳差運動などを含む「歳差連星ブラックホール理論」の正しさや、それを用いた無毛定理の検証精度が積み上げられてきました。



図 2：大阪教育大学天文台の口径 51cm 反射式望遠鏡

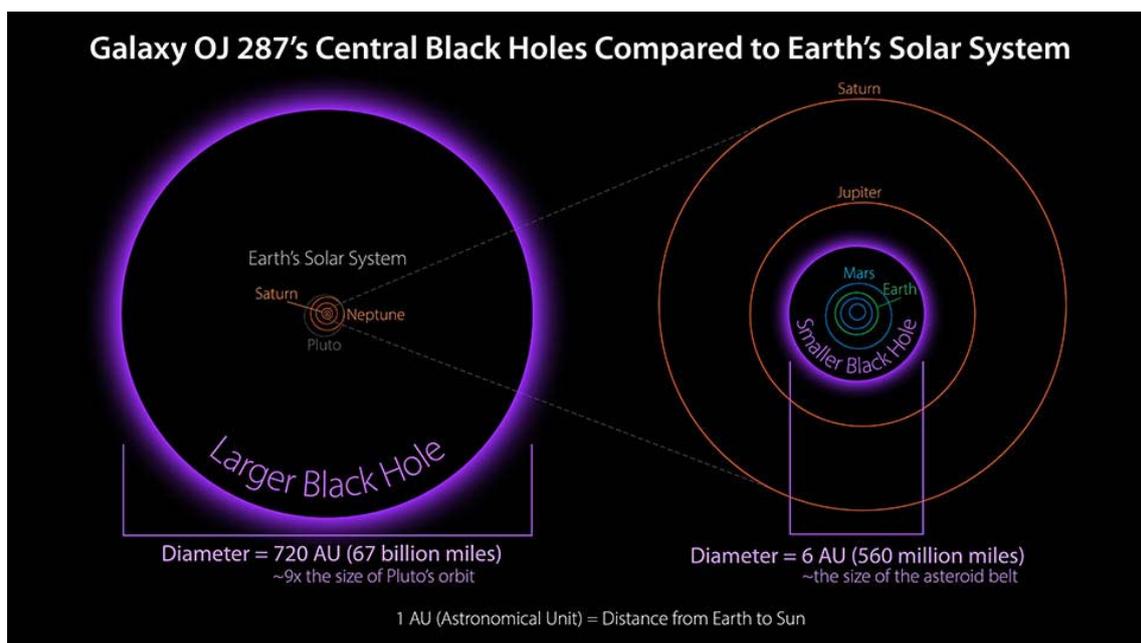


図 1：太陽系と比較した OJ 287 連星系を構成するの 2 つのブラックホールの大きさの概念図。左が中心のブラックホール（直径 720 天文単位）、右が衛星ブラックホール（直径 6 天文単位）。（クレジット：NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC)）

OJ 287 の衛星ブラックホールは、中心の超巨大ブラックホールのまわりを、たとえると太陽系の彗星のように、大きな離心率の楕円軌道で公転しています。また中心のブラックホールの周囲には降着円盤と呼ばれるガス円盤構造が存在し、衛星ブラックホールは 1 公転につき 2 回、その降着円盤に衝突し突き抜けます。その際に OJ 287 は自身の銀河全体の明るさを上回る大規模な増光を起こします（図 3）。したがって、この衝突による特殊な増光を観測し、それがいつ起きたかを正確に知ることによって、衛星ブラックホールの公転軌道

を詳細に分析することができます。さらにこの増光の発生時期は、OJ 287 連星系の力学を一般相対性理論の効果を含めて計算するポストニュートン近似項のうち spin-orbit 寄与項へ現れる、ソーン博士が提唱した「ブラックホール周囲の時空と、ブラックホールの自転の状態 (Kerr パラメータ) を結びつける無毛定理に関する係数」に強く相関していることが予測されます。具体的には、OJ 287 の連星軌道を一意に決める方程式の解によってこの係数の値を有意に決定できれば、ブラックホールの無毛定理の正否をテストできます。その係数が 1.0 のとき、中心の巨大重力源において無毛定理は成立しており、1.0 より有意に異なる値を採用しなければ OJ 287 の連星軌道を説明できないならば、その重力源は一般相対理論から導かれる真のブラックホールとは異なる構造体であることとなります。

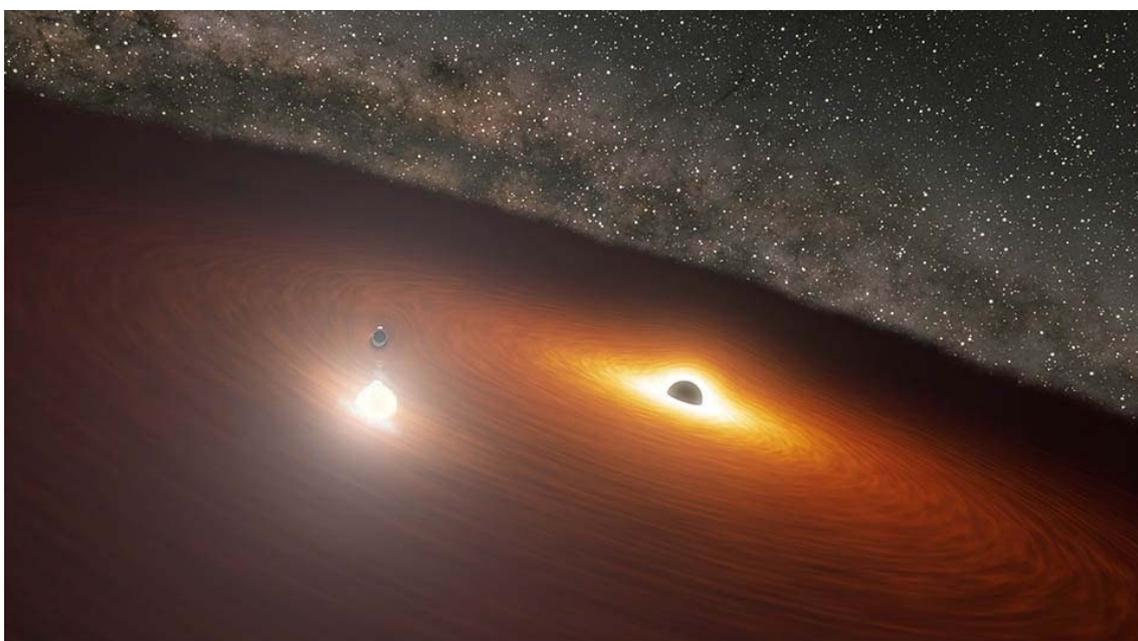


図 3 : OJ 287 の連星ブラックホールの想像図。右の中心のブラックホールを、左の衛星ブラックホールが約 12 年周期で公転運動しています。中心のブラックホールの周囲には降着円盤と呼ばれるガス円盤構造が存在し、衛星ブラックホールは 1 公転につき 2 回それに衝突し突き抜けることとなりますが、その際に膨大な光が発せられます。2019 年 7 月の増光は、衛星ブラックホールが地球から見て降着円盤の反対側から手前側へ突き抜けることで生じました (地球は図の上方に位置するとした構図)。(クレジット : NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC))

OJ 287 を用いた一般相対性理論の観測的検証

その結果、OJ 287 の衛星ブラックホールの公転軌道の解がブラックホールの無毛定理を検証するに十分な精度で解析されました。2016 年までの観測結果から、衛星ブラックホールと降着円盤との衝突による増光が 2019 年 7 月末頃に起こると予測されました。しかし、かに座に位置する OJ 287 はその時期は太陽の方向と重なるため、地上からの観測は事実上

不可能です。そこで本研究グループは、NASA の Spitzer 宇宙望遠鏡 (図 4) を用いました。この宇宙望遠鏡は地球から離れた位置で天体を観測しており、同時期においても OJ 287 の方向を見ることができました。また地上からも OJ 287 の明るさの振る舞いが継続的に追跡され、増光予測時期前後には観測限界に挑戦する試みもなされました。それらの結果、増光は予測通りに起こり (予想外には起こらず)、そのタイミングは中心のブラックホールに有意な「毛」がないことを示していました。

したがって、少なくとも OJ 287 のブラックホールは一般相対性理論で記述される場所の真のブラックホールであることが明らかとなりました。また、これまでも多くの天体現象によって検証されてきた一般相対性理論の確かさが、別の観測的側面からも支持されることになりました。さらに、この事実を援用すれば、M87 やその他の銀河の中心部に存在すると考えられる超巨大ブラックホールについてもやはり真のブラックホールと言えるであろう蓋然性が高くなります。地球を含む太陽系が所属する天の川銀河の中心にも、約 400 万太陽質量の超巨大ブラックホールが存在していることがほぼ間違いないとみられています。

本稿のしめくくりとして、この OJ 287 の連星ブラックホールの公転軌道は、冒頭で紹介した EHT で解像できるかできないか、ぎりぎりの大きさを持っています。また今回の研究の過程で、衛星ブラックホールの公転軌道の変化は、同天体がナノヘルツ重力波を放出していることが明らかになりました。重力波とは、やはりアインシュタインの一般相対性理論から予言された、重力源の運動により生じる時空のさざなみです。重力波の存在は 2015 年に地上の重力波天文台 LIGO で初めて検出され、それ以後も次々と見つっていますが、それらはいずれも中性子星や恒星質量ブラックホールの合体現象から生じたものである一方、超巨大ブラックホールから発生する重力波は、地上の重力波天文台では検出できないと考えられています。今回の OJ 287 の観測は、現在進行中である EHT による OJ 287 のブラックホールペアの撮像、およびナノヘルツ重力波を検出しようとしている国際パルサータイミングアレイ (International Pulsar Timing Array) への布石を与えるものです。

本研究成果は The Astrophysical Journal Letters, Volume 894, Number 1 にて論文発表されました。また、下記の NASA によるプレスリリース (英語) も発行されています。

<http://www.spitzer.caltech.edu/news/2271-ssc2020-11-Spitzer-Telescope-Reveals-the-Precise-Timing-of-a-Black-Hole-Dance>

<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7648>



図 4 : Spitzer 宇宙望遠鏡のイラストレーション (クレジット : NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC))

用語解説

・ OJ 287

OJ 287 は「ブレーザー」に分類される活動銀河核です。ブレーザーはさらに「フラットスペクトル電波クエーサー」と「とかげ座 BL 型天体」に細分類されることがありますが、この天体は後者に分類されます。宇宙の膨張による赤方偏移は 0.306 で、地球から約 35 億光年に位置していることとなります（ただし距離は採用する宇宙論パラメータにより変わります）。元々は、宇宙起源の電波源として発見されましたが、可視光でも約 15 等の点光源として観測できます。OJ 287 の最もきわだった特徴は、すくなくとも過去 120 年間、平均すれば約 12 年周期で大増光をくりかえしていることです。この現象（増光の時期や規模）を説明するために 1996 年にフィンランドの研究者達によって提唱されたのが「歳差連星ブラックホールモデル」です。このモデルでは、約 180 億太陽質量のブラックホールの周囲を、約 1.5 億太陽質量のブラックホールが約 12 年の公転周期で周回することで、一般相対性理論の効果により公転軌道が大きく歳差し、厳密には周期的でない過去の増光時期を説明することでき、将来の増光時期も事前に予測可能です。下記 URL もご参照ください。

http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~katsura/OJ_287.html

・ ブレーザー

活動銀河核の一種で、他の活動銀河核と同様に、銀河中心の超巨大ブラックホールへ落下する大量の物質から解放される重力エネルギーにより活動性を帯びます。また、落下物質が形成する降着円盤面の垂直方向へ細く絞られたジェットが吹いています。ブレーザーは活動銀河核の中でも電波放射が比較的強く、電波から X 線にわたってジェット由来のシンクロトロン放射が卓越しています。また可視光域で激しい変光を示し、スペクトルの輝線が弱いかほとんど検出されません。このような特徴から、ブレーザーは活動銀河核のなかでもジェットがたまたま地球へ向いている位置関係にあるものと考えられています。

・ 超巨大ブラックホール

厳密な定義ではありませんが太陽質量のおよそ 100 万倍を超えるようなブラックホールを指します。ブラックホールは質量と大きさに正比例の関係があるため、重いブラックホールほど巨大であるといえます。専門用語としては超大質量ブラックホール（supermassive black hole）と呼ばれます。