

一般相対性理論の100年祭——予言されたOJ 287のアウトバーストと超大質量ブラックホールのスピンの決定

松本 桂, 小路口直冬, 上別縄拓, 杉浦裕紀, 定金晃三

〈大阪教育大学 〒582-8582 大阪府柏原市旭ヶ丘4-698-1〉

e-mail: katsura@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

他のクエーサーには見られないOJ 287のユニークな特徴として、約12年間隔で準周期的にアウトバーストを起こし、さらに各アウトバーストには必ず2回の明るさの極大が伴うことが挙げられます。その現象は、超大質量ブラックホール（BH）連星系において、伴BHが主BHの降着円盤に1公転につき2度衝突するモデルで説明されます。しかし近年の観測により、実際のアウトバーストの時期と理論予測とのずれが無視できない問題となりました。一般相対論的歳差、重力波放射、ならびに主BHのスピンを考慮して改良された軌道モデルから、次のアウトバーストの時期が2015年12月上旬と予測されました。我々を含む国際的な検証観測の結果、このアウトバーストの時期が正確に決まり、同時に超大質量BHのスピンを高い精度で決定できました。

1. 一般相対性理論が予言した重力波

2016年2月、アドバンスドLIGOによる重力波の直接検出が報告され¹⁾、国内の報道でも大きく取り扱われるなど話題を呼びました。重力波²⁾は一般相対性理論により予言された現象の一つであり、その観測的検証は100年来の悲願であったといえます。ただ、それ以前から、間接的な証拠ではありますが、天体からの重力波の発生は既に間違いないと考えられていました。ラッセル・ハルスとジョゼフ・テイラーは、1974年に発見された二つの中性子星からなる連星系PSR B1913+16の公転周期の変化を、片方のパルサーからのパルスの到着時刻を利用して調査しました³⁾。中性子星同士の連星系では、強い重力場の存在が期待できます。その結果、公転周期はたしかに短縮しており、さらにその周期変化は重力波放出によるものと仮定した場合の予想値とほぼ一致してい

ました^{4), 5)}。それにより同天体からの重力波放出はほぼ確実であると考えられ、1993年のノーベル物理学賞の対象になりました。

重力波を直接検出するには莫大な予算と設備が必要になります。一方、一般相対性理論が予言した奇妙な現象のうち、例えば空間の歪みを見るのであれば、常識的な観測手段でも手が届きそうです。1919年5月29日の皆既日食の際、アーサー・エディントンが主導した英国の観測隊は、おうし座の恒星の視位置が太陽の重力場のため僅かに変化して見える現象を実際に捉えました⁶⁾。重力レンズ現象も、CCDカメラを用いることで比較的容易に見ることができます。またGPSは人工衛星の時間の進みや遅れ（後者は特殊相対論の効果ですが）を考慮しなければ使い物にならないことも広く知られています。しかし重力波だけは、手軽な手段ではどうにも手が届きそうにありません。

重力波放射の効果を測定するには、質量が大きな天体ほど有利です。大質量かつ公転運動をしている天体を観測すれば、ハルス&テイラーと同様のロジックにより、間接的ながら重力波の存在を実感できるかもしれません。そして、それが実際にできた、と考えられるのが、本稿で紹介する超大質量ブラックホール連星OJ 287が約12年周期で起こす大増光（アウトバースト）の測光観測の結果です。

2. OJ 287 略史

OJ 287は割と有名な天体ですので、ご存じの方も多と思われるのですが、天文月報の主旨にも照らし、研究の歴史を簡単に紹介いたします。

2.1 黎明期——変な電波源

この天体の名前が文献上に最初に登場したのは、イリノイ大学バーミリオン・リバー天文台の電波サーベイ⁷⁾におけるVRO 20.08.01、またアメリカ国立電波天文台のペンシルベームサーベイ⁸⁾におけるNRAO 0852+20と呼ばれた電波源と思われる。どちらのカタログにおいても、特段の注記はなされていませんが、電波源として初めて日の目を見ることになった天体といえます。

よく使われる名称であるOJ 287は、オハイオ州立大学の電波サーベイカタログでの呼称に由来します⁹⁾。そのカタログから特異な電波スペクトルを示す天体を抽出した論文において、フラットなスペクトルを示すこと¹⁰⁾、およびパロマー・スカイ・サーベイの写真に恒星状の天体が写っていること¹¹⁾のみが初めて、かつ簡潔に言及されています。

OJ 287の可視光域における時間変動は、電波での発見からほどなくして観測されており¹²⁾、日スケール程度の時間変動や偏光を示すことも明らかにされました¹³⁾⁻¹⁵⁾。日本においても、堂平の91 cm望遠鏡と鹿島の26 m電波望遠鏡を用いて、可視と電波の同時観測の試みがなされています¹⁶⁾。

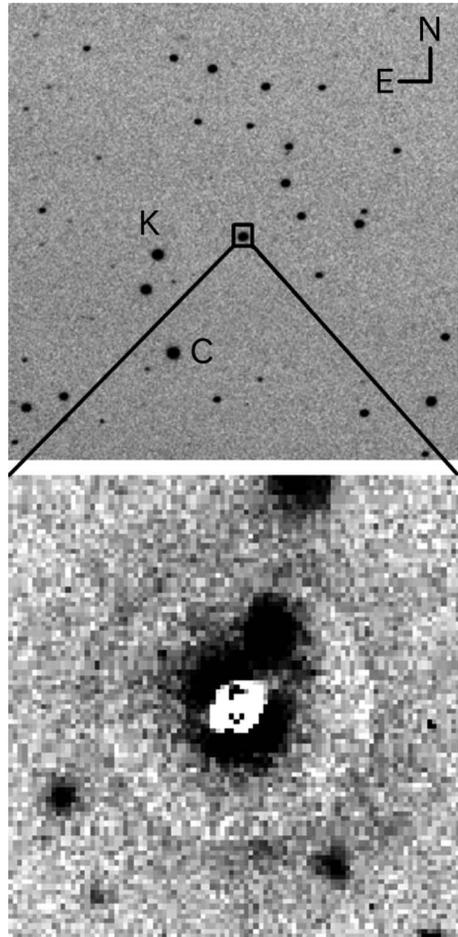


図1 上：大阪教育大学51 cm望遠鏡によるOJ 287周辺の R_c バンド画像（視野 $7' \times 7'$ にトリミング）。CおよびKは今回の観測で使用した比較星。下：ESO VLTによるOJ 287の R_c バンド画像²³⁾（視野 $20'' \times 20''$ ）。OJ 287は点光源には見えませんが（上）、モデルPSFを減算すると母銀河の成分が見えてきます（下）。

やや話は逸れますが、オハイオ州立大学の電波源カタログの命名法¹⁷⁾においては、接頭辞はOhioのOと、それに続く一文字のアルファベットを天体の赤経によってB（0時台）からZ（23時台）とします（Oは使用しません）。数字は、最初の1桁が 10° 台ごとの天体の赤緯を表し、2桁目以降は赤経（時）の小数部としますので、連番になっていません。このカタログには、ON 231

(W Com), OR - 225 (AP Lib), OY 401 (BL Lac) など、可視光で明るく、かつ恒星状に見えるため従来は変光星として認識されていたクエーサーも登録されています。OJ 287も変光を示す明るい恒星状の光源ですが(図1上)、GCVS変光星名はありません。

2.2 BL Lac型天体の確立

上記のような観測的特徴を根拠として、OJ 287は1972年に提案されたクエーサーの新しい分類であるBL Lac型天体の一つとして認識されるようになりました¹⁸⁾⁻²⁰⁾。この型の天体の特徴としては、1) 可視光から電波にわたる明るさと偏光の激しい時間変動、2) 目立つ輝線が欠如した平坦な可視光スペクトル、3) 非熱的スペクトル、などが挙げられます。1978年には、BL Lac型天体の特徴は、視線方向に相対論的速度で運動するジェットに起因するものと示唆されています²¹⁾。

OJ 287に付随する星雲状物質(nebulosity)が1975年に最初に指摘されますが²²⁾、中心核の圧倒的な明るさのため、銀河成分の確証に至るには時間がかかりました^{23), 24)}(図1下)。また、可視スペクトル中の微弱な輝線を用いてOJ 287の赤方偏移が最初に報告されたのは1978年²⁵⁾、それが確認されたのは1985年²⁶⁾のことで、近年では $z=0.3056\pm 0.0001$ の値が報告されています²⁷⁾。仮にハッブル定数を $67.15 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ とすると、距離は約36億光年となります。他のクエーサーと同様に、極めて遠方にあるにもかかわらず、銀河系内の恒星と変わらない明るさで地球から見えていることとなります。

2.3 約12年周期のアウトバースト

この天体に関して、後になって見返すと幸運だったことは、発見直後で注目を集めつつあった1971年に、記録上では最大規模のアウトバーストを起こしていたことです²⁸⁾。OJ 287は静穏時においても1等程度以下の範囲で明るさを激しく変化させることが知られていますが、それとは明確に区別できる有意な大增光でした。そのため、

光学対応天体の過去の明るさをサーベイ写真から遡って調査する機運が生まれ、アメリカのハーバード大学天文台やドイツのゾンネンベルグ天文台など各地の写真乾板アーカイブを使って調査が行われました²⁹⁾。

その結果、OJ 287は少なくとも19世紀末頃から約12年の周期で大規模なアウトバーストを繰り返していたことが明らかになりました(図2)。さらに1971年以降の観測から、各アウトバーストは1-2年程度の間を置いた二つの極大を伴っていることもわかりました。これは同種の他の天体には見られないOJ 287の極めてユニークな特徴です。そして、この特性を説明するモデルとして、超大質量ブラックホールの連星モデルが提唱されました³⁰⁾。

3. 超大質量ブラックホール連星モデル

3.1 連星モデルの登場

提唱当時、クエーサーを超大質量天体の連星で説明する考え方自体は存在していました^{33), 34)}。OJ 287の場合、約12年の周期性は超大質量ブラックホール同士の連星系の公転周期を見てると解釈されました。元々は、 $z=0.306$ の静止系において9年で公転する伴ブラックホールが、主ブラックホールの降着円盤からのインフローを誘発することで、地球において11.6年周期で起こるアウトバーストを説明するモデルでした³⁰⁾。

OJ 287の超大質量ブラックホール連星モデルは、その後、約12年ごとに起こるアウトバーストのたびに改良が加えられてゆきました。

3.2 一般相対論的歳差の導入

OJ 287のアウトバーストの周期は厳密には一定ではないことが1990年代になって明らかとなり、その周期変動を説明するために、伴ブラックホールの軌道が一般相対論的効果により歳差(近点移動)を起こしているモデルが提案されました³⁵⁾⁻³⁷⁾。さらに、従来のモデルでは2006年9月に予言されていたアウトバーストが現実には

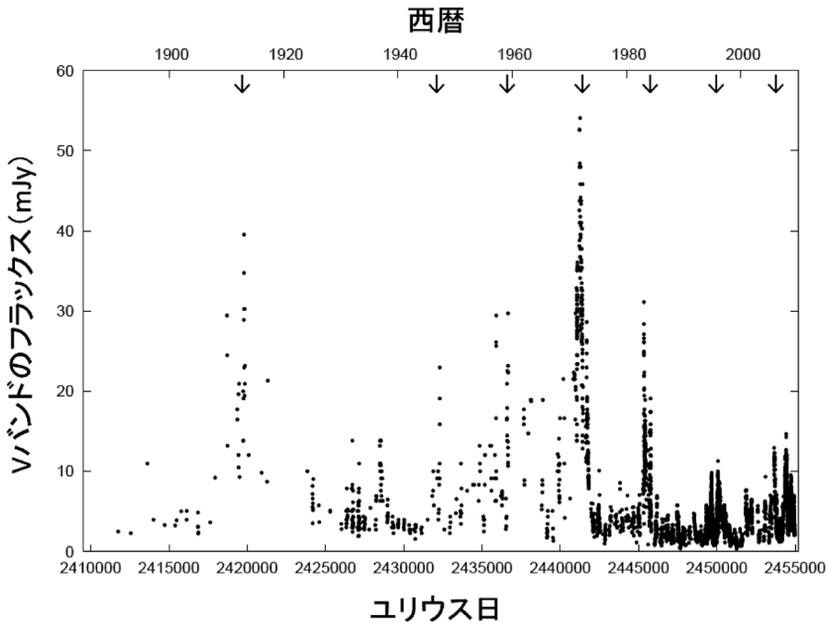


図2 過去120年間にわたる光度曲線³¹⁾を見ると、OJ 287は約12年ごとに準周期的なアウトバーストを起こしていることがわかります。また1回のアウトバーストには二つの極大が伴っています。それらのうち、矢印で示した1913, 1947, 1957, 1973, 1983, 1984, 1996, 2005, 2007年の極大が軌道の決定のために使われ、主ブラックホールのスピンパラメータの概算値が得られました³²⁾ (ただし矢印は1アウトバーストにつき1本)。比較的最近である1994年のアウトバーストは、いつ始まったのかが高い精度では決まらなかったため使われませんでした (出典元の図中の文字を日本語に改変)。

2005年11月に起き、予想より10カ月早かった事実を説明するためにモデルが改良されました。その際に、重力波による連星系からのエネルギー損失を考慮したモデルと考慮しないモデルを比較検討し³⁸⁾、重力波によるエネルギー損失を考慮した場合、2005年のアウトバーストの2回目の極大は、2007年9月9-16日の間に起きると予測されました³⁹⁾。

3.3 重力波放出の間接的証明

2007年9月の極大に際しては、国際的な観測キャンペーンが実施され、大阪教育大学も参加しました。その結果、2回目の極大は2007年9月12日に起きたことが確認されました。さらに増光中は偏光度が非常に低くなり、熱的な放射となっていることも明らかになりました⁴⁰⁾。

したがって、増光の時期を予測するにあたり、重力波による軌道運動エネルギーの損失を考慮す

る必要があることがわかりました。エネルギー損失を考慮しないモデルだと、2007年9月の極大は3週間ほど遅れて起きたはずでした⁴⁰⁾。この結果は、OJ 287の連星系の軌道周期は1公転につき20日ほど短縮していること、すなわち公転軌道が縮小しつつあることを示しています。この事実はOJ 287が重力波を放出していることの間接的証明に他なりません。そして、そう遠くない将来(減衰率を単純に外挿すると1万年以内)にはブラックホール同士の合体が起きるはずですが、その際には、アドバンスドLIGOが検出した重力波の源GW 150914をはるかに上回る重力波が放出されるはずですが。

2005-2007年のアウトバーストの結果から、歳差は1公転につき 39.0° 、主ブラックホールの質量は $1.8 \times 10^{10} M_\odot$ 、次のアウトバーストの予想時期は2016年1月の初め頃、などの値が推定さ

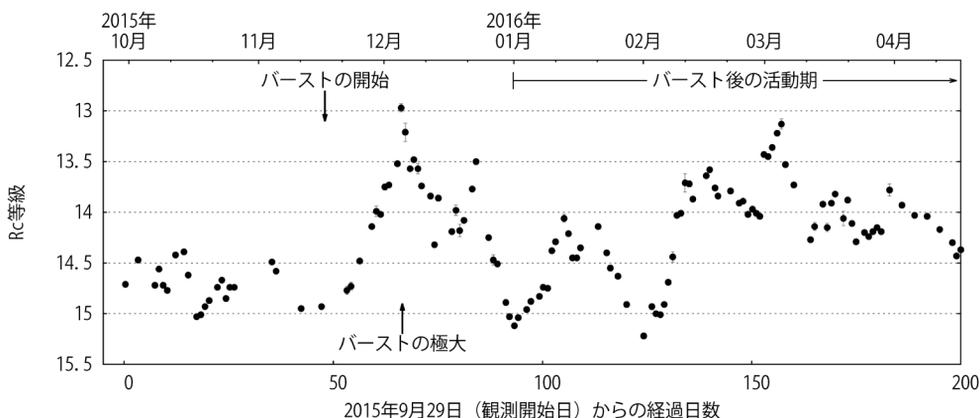


図3 大阪教育大学において得られた2015年9月から2016年4月にかけてのOJ 287の光度曲線(1日ごとの平均値)。123日分の観測点からなっており、観測期間の全日数の約6割にあたります。アウトバーストの開始および極大のタイミングは、国際観測キャンペーンへ集約されたデータから決められました⁴⁴⁾。比較的明るい時期の大きなエラーバーは、大きな日内変動の振幅に起因しています。

れました⁴⁰⁾。このOJ 287の歳差は、太陽の重力場が及ぼす水星の一般相対論的歳差(100年間で $43''$)^{*1}に比べて非常に大きなものです。これはOJ 287のような極めて強い重力場の中におかれた天体に特有の現象であり、いわばOJ 287は超強重力環境下での物理学の実験場といえます。また、このような大質量のブラックホール天体から生じる重力波は、NANOGrav⁴¹⁾やeLISA⁴²⁾の良いターゲットになると予想されます。

4. 予言どおりに起こったアウトバースト

4.1 スピンパラメータの決定

主ブラックホールがスピンを持っていると、伴ブラックホールの軌道に歳差が引き起こされることが予想されます。スピンの大きさが歳差の状態が決まり、それによってアウトバーストの起きる時期が決まります。逆に言えば、アウトバーストの起きる時期を正確に決めることでスピンの大きさを決定できる、と考えられます。主ブラックホールのスピンパラメータ(Kerrパラメータ a)⁴³⁾を考慮することにより、2005-2007年の次のアウ

トバーストは、2015年12月8日±8週間の期間に起きると予想されました(Valtonen & Gopakumar 2015, private communication)。予想時期に付けられた8週間の不確定さは、2008年までの観測データを用いて求められた大まかな値($a=0.28\pm0.08$)を中心として可能な範囲を見込んだものです^{32), 43)}。

この2015年のアウトバーストに対しても国際的な観測キャンペーンが実施され、大阪教育大学では2015年9月29日からモニタ観測の頻度を上げ、集中的な測光観測を行いました。この観測キャンペーンには計16カ国、50カ所以上の天文台が参加しました。またアマチュアの観測者も多く含まれていました。日本からは大阪教育大学がRcバンドの測光観測で参加したほかに、東北大学(惑星プラズマ・大気研究センター)がハワイ・マウイ島のハレアカラ観測所60cm望遠鏡で偏光観測を行いました。

そのような態勢で行われた観測の結果、アウトバーストは2015年11月16日±2.5日に始まり、12月4-5日に極大を迎えたことがわかりました(図3)。このときも偏光度が非常に低くなり、熱

*1 実際にはほかの惑星(特に木星と土星)の影響も受けるため、現実の水星の歳差はより大きな値となっています。

的な放射であることが確認されました。また同時期に行われたSwift衛星の観測の結果、アウトバースト時にX線の強度は上昇せず、紫外線領域では可視光と似たアウトバーストが生じたことも確認されました。偏光度が小さい熱的な放射は、伴ブラックホールが主ブラックホールの降着円盤と衝突したときに発生する高温ガスのバブルから出るものと考えられます⁴⁴⁾。

これらの事実から、主ブラックホールのスピンパラメータを $a=0.313\pm 0.01$ と決定しました⁴⁴⁾。すなわち、OJ 287の主ブラックホールは、理論的に許される限界の値の約3割の速さでスピンしていることが明らかとなりました。また超大質量ブラックホールのスピンパラメータを、ここまでの精度で観測的に推定できたのは初めての例ではないかと思われます。

今回決定された主ブラックホールのスピンの値については、さっそく興味深いとする人も疑義を抱く人も現れているようです⁴⁵⁾。ブラックホールのスピンの観測的推定にあたっては、X線領域の鉄のK α 線を用いる方法などいくつかの手段が知られていますが⁴⁶⁾、連星ブラックホールの軌道運動を用いる方法が適用されたのはOJ 287以外にまだ類例がありません。鉄輝線のプロファイルが降着円盤の最内縁の運動状態を反映していると考えてスピンを推定すると、例えばいくつかの活動銀河核のブラックホールにおいて、理論的に可能な限界値に近いスピンを持っていると結論される例が報告されています^{47), 48)}。しかし、活動銀河核の超大質量ブラックホールが限界値に近いスピンを持っていなければならない必然性もまた、特にないと思われる⁴⁶⁾。ブラックホールのスピンは、その成長の歴史をたどる手がかりを与えており、宇宙最大級の質量をもつと考えられるOJ 287の主ブラックホールのスピンの限界値の約3割であることは、その形成史について何らかの示唆を与えているものと考えられます。

4.2 超大質量ブラックホール連星モデルの完成

2015年のアウトバーストの観測から明らかにされたOJ 287の物理量は、主ブラックホールの質量が $1.83\pm 0.01\times 10^{10} M_{\odot}$ 、伴ブラックホールの質量が $1.5\pm 0.1\times 10^8 M_{\odot}$ 、軌道離心率 $e=0.700\pm 0.001$ などとなりました⁴⁴⁾。これらのパラメータによって、超大質量ブラックホール連星モデルに基づくOJ 287の描像(Valtonenモデル)はほぼ確立したと思われます(図4)。すなわち、その公転軌道は一般相対論の効果と主ブラックホールのスピンにより大きな歳差が生じており、さらに超大質量天体同士の運動により重力波が放出されていると考えれば、観測されるアウトバーストの時期を極めて狭い範囲で予言できます。1回のアウトバーストにつき2回の極大が生じる要因は、伴ブラックホールが主ブラックホールの降着円盤へ1公転につき2度衝突すると解釈します。ただし、この衝突によるエネルギー損失は、重力波放出によるエネルギー損失のおよそ1万分の1以下しかなく、連星モデルへの考慮は必要なさそうです。衝突時には、大量の物質が主ブラックホールの降着円盤から引き抜かれ、しばらくの間OJ 287に活動性を与えると考えられます^{44), 49)}。

なお、ここまでOJ 287の本体および12年周期のアウトバーストを説明する超大質量ブラック

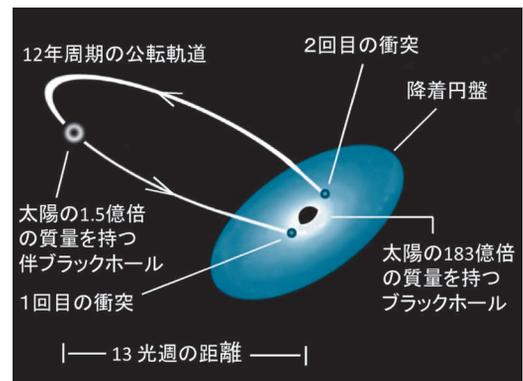


図4 OJ 287の超大質量ブラックホール連星モデルの概略図(クレジット: Gary Poyner; 出典元の図中の文字を日本語に改変)。

ホール連星モデルを紹介してきましたが、それとは異なる方法で説明を試みるモデルもいくつか提案されています^{31), 50), 51)}。しかし、実際の観測結果との比較を通してモデルの検証をする観点からすると、高い精度の観測的検証に（今のところ）耐え、アウトバーストの極大時期をかなり正確に予測できるように改良されたValtonenモデルは、それなりの説得力をもっていると思われます。

4.3 明るさの激しい時間変化

今回の国際観測キャンペーンでは、アウトバーストの開始が明らかになりつつある頃から、OJ 287が示す日内変動（intraday variability）の探索も行われました。日内変動はOJ 287の歴史において早くから着目されていた現象ですが⁵²⁾、特に今回の増光中の時期において、多数の日内変動が検出され、大阪教育大学では海外の他サイトでは観測できない時間帯のユニークなデータが取得できています。

OJ 287の明るさの激しい時間変化の一例を、図5および図6に示します。図5は日本時間の2015年12月7日夜に観測されたもので、約7時間の間に非常に早い有意な変動が可視光で見られたことを示しています。図6の光度曲線の前半は日本時間の2016年2月10日夜、後半は翌11日夜の観測データです。2月10日夜には6時間程度の

期間で0.25等（約25パーセント）の増光があり、翌日には逆に減光があったことを示しています。光の速さは有限ですので、変光を起こしたことが外から認識できるためには、変光源の大きさが変光のタイムスケール×光速以下でなくてはなりません。図6の増光の場合、距離にして6光年以下（太陽系の大きさ程度）の空間の中で起きている現象を見ていることになります。OJ 287の可視光での明るさは約14等ですので、36億光年の距離にある場合の絶対等級は約-26等となります。普通の渦巻き銀河の絶対等級は明るいもので-22等程度ですので、OJ 287の明るさは普通の銀河の数十倍もあることになります。しかもそれが出す光の大部分は、上に述べたように極めて小さい空間から出ています。改めて言うまでもありませんが、これは実に驚くべきことです。

図6には大阪において太陽光のため観測できない時間帯を示していますが、短時間変動の情報を詳しく解析するには可能な限り切れ間のない連続的な観測データが必要です。今回の観測キャンペーンではさまざまな経度からの参加がありましたので、この隙間を埋めるデータも含め全てのデータを集積し、周期性の検討その他の詳しい解析が進みつつあります。

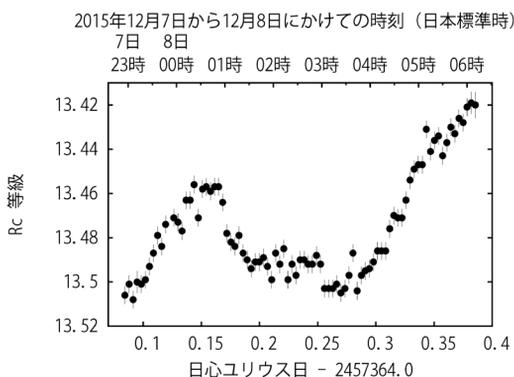


図5 OJ 287の日内変動の例1（大阪教育大学において2015年12月7日深夜から8日未明にかけて得られた光度曲線）。

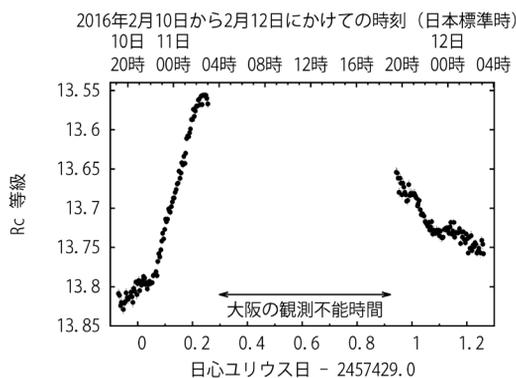


図6 OJ 287の日内変動の例2（大阪教育大学において2016年2月10日夜から12日未明にかけて得られた光度曲線）。この時期には午前4時頃から午後7時頃まで観測できない空白が約15時間できます。

4.4 日本（極東）の重要性

2015年のアウトバーストに際しては、連星ブラックホールモデルの検証のために、極大の時期を1日以下の精度で決めることが求められていました。日スケール以下の変動の観測では、図6に記したような昼間によるデータの切れ目をなくするため、地球上の経度方向に隙間なく望遠鏡を配置することが望まれます。その点に関して、日本を含む極東アジアは太平洋による陸地のギャップが最初に終わる地点として重要視されることがあります。結果的には、日本の我々が2015年アウトバーストの極大を挟んだ直前側の観測点を抑えることができました。これは経度の関係で他の観測サイトでは取得できないデータでした。

ここで我々の事情に少しだけ触れさせていただくと、OJ 287のように比較的明るく、また測光観測で有用な観測ができる天体は、大阪教育大学がもつ数十 cm クラスの小口径望遠鏡で可能なサイエンスの対象として、非常に適していると考えてきた経緯があります⁵³⁾。前々回の1994-1996年⁵⁴⁾、前回の2005-2007年⁵⁵⁾のアウトバーストでは、OJ 287が示すといわれていた約12年の周期性は間違いないものと確認できました。その一方で、12年の周期は厳密には一定ではないこともわかり、連星軌道の理論の改良へつながりました。今回のアウトバーストは、大阪教育大学におけるOJ 287の理論モデルの観測的検証としては三度目の試みとなりました。しかし、それはここでは終わりません。まだ続きがあります。

5. 試金石：2019年の検証に向けて

2015年のアウトバーストの観測では、今のところ、Valtonenモデルが想定している前提、すなわち一般相対性理論の効果による歳差、重力波による軌道運動エネルギーの損失、ならびに主ブラックホールのスピンの値の妥当性が確かめられたと考えて良さそうです。なぜ“今のところ”かというと、2015年の増光はペアとなって2回生じ

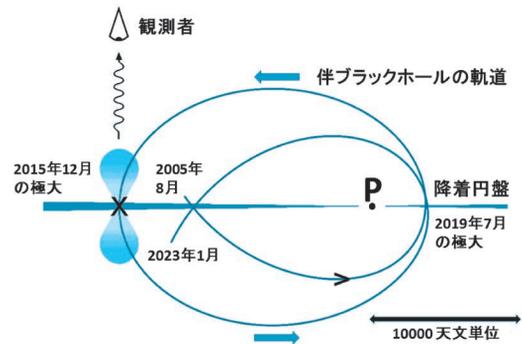


図7 主ブラックホールの降着円盤を真横から見たOJ 287連星系の2005から2023年までの公転軌道の予測図⁴⁴⁾。Pの位置に主ブラックホールがあり、観測者は図の上方から系を見ています。2015年12月のアウトバーストの極大は、伴ブラックホールがXの位置を通過することで起きたと考えます。図4の“1回目の衝突”に対応します。Xの上下には、衝突で加熱された高温ガスが膨張している様子を模式的に描いています。2019年7月に予想される極大は、主ブラックホールの反対側で起きます。図4の“2回目の衝突”に対応します。2007年の極大もほぼ同じ場所で起きました（出典元の図中の文字を日本語に改変）。

るアウトバーストの極大の、1回目だからです。すなわち、まだ2回目の極大時期の検証が残されています（図7）。

最新の軌道モデルによると、この2回目の極大では、2019年7月13日18時（世界時）から増光が始まり、7月26-27日の間に極大を迎えると予想されています。極大時のフラックスの上昇は静穏時との比で2.4倍と推定されており、2019年の増光の基準レベルとなる静穏時等級の決定と、7月26日18時（世界時）から翌27日の12時（世界時）を中心とする期間の測光観測が必要とされています（Valtonen 2016, private communication）。まず、2019年の極大時期の予想が再び観測的検証に耐えうるかどうかが目玉されます。また、次回の観測の目標とされるブラックホール無毛定理（no-hair theorem）⁵⁶⁾を10パーセントの信頼性で確認するために、±2時間程度の精度が

必要とされています⁴³⁾。

したがって、OJ 287のモデルの妥当性をさらに検証するためにも、2019年7月の観測が重要になってくるのですが、残念ながらそれは簡単ではないことが既にわかっています。その時期のOJ 287の方向（かに座）は地球から見て太陽に非常に近く、地上からの観測は極めて困難と予想されるからです。赤道付近が有利と考えられますが、日本の最南でも北緯25度程度ですので、国内では7月1日の時点で日没後30分以内の観測となり、7月15日になるとほとんど観測できません。おそらく惑星間空間まで出るか、太陽をマスクする人工衛星などを用いて、さらに可視光で約15等の天体まで撮像できる何らかの手段が必要となります。観測キャンペーン参加者の議論では、冥王星探査機ニューホライズンズの望遠カメラLORRIを向けてもらってはどうか、などの話も出ていますが、具体的な目処は立っていません。本稿をお読みいただいた方で、もしなにかアイデアをおもちでしたら、筆者までご連絡をいただけましたら幸いです。

2015-2016年は一般相対性理論の誕生100年を記念する年でしたが、奇しくも2019年は冒頭で言及したエディントンの日食観測による一般相対性理論の検証から100年を記念する年となります。ぜひとも打開策を見つけないとところです。

謝 辞

本稿で紹介した大阪教育大学における観測は、福嶋大樹さん、宇都祐介さん、辰巳太基さん、山田英史さんを含む学生観測チームの多大な協力のもとに行われました。また大阪教育大学の福江純さんからは、投稿前の原稿に対して有益なコメントをいただきました。各位に感謝の意を表します。本稿は国際的な学術誌で出版済みの査読論文（文献40と44）に基づいております。詳細についてはそちらをご覧ください。

参考文献

- 1) Abbott B. P., et al., 2016, Phys. Rev. Lett. 116, 061102
- 2) Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A., 1973, Gravitation (W. H. Freeman and Company, San Francisco) p. 941
- 3) Hulse R. A., Taylor J. H., 1975, ApJ 195, L51
- 4) Taylor J. H., Weisberg J. M., 1982, ApJ 253, 908
- 5) Taylor J. H., Weisberg J. M., 1989, ApJ 345, 434
- 6) Dyson F. W., Eddington A. S., Davidson C., 1920, Philos. Trans. Roy. Soc. London. Series A 220, 291
- 7) Dickel J. R., et al., 1967, AJ 72, 757
- 8) Hoglund B., 1967, ApJS 15, 61
- 9) Dixon R. S., Kraus J. D., 1968, AJ 73, 381
- 10) Kraus J. D., et al., 1968, ApJ 152, L35
- 11) Thompson J. R., Kraus J. D., Andrew B. H., 1968, ApJ 154, L1
- 12) Folsom G. H., et al., 1971, ApJ 169, L131
- 13) Kinman T. D., Conklin E. K., 1971, Astrophys. Lett. 9, 147
- 14) Dyck H. M., et al., 1971, Nat. Phys. Sci. 234, 71
- 15) Kinman T. D., 1976, ApJ 205, 1
- 16) Kikuchi S., et al., 1973, PASJ 25, 555
- 17) Kesteven M. J. L., Bridle A. H., 1977, J. Roy. Astron. Soc. Canada 71, 21
- 18) Strittmatter P. A., et al., 1972, ApJ 175, L7
- 19) Le Squéren A. M., Biraud F., Lauqué R., 1972, Nat. Phys. Sci. 240, 75
- 20) Stein W. A., O' Dell S. L., Strittmatter P. A., 1976, ARA&A 14, 173
- 21) Blandford R. D., Rees M. J., 1978, in Pittsburgh Conference on BL Lac Objects, ed. Wolfe A. M. (University of Pittsburgh Press, Pittsburgh) p. 328
- 22) Kinman T. D., 1975, in Variable stars and stellar evolution, eds. Sherwood V. E., Plaut L. (Springer, the Netherlands) p. 573
- 23) Heidt J., et al., 1999, A&A 352, L11
- 24) Nilsson K., et al., 2003, A&A 400, 95
- 25) Miller J. S., French H. B., Hawley S. A., 1978, in Pittsburgh Conference on BL Lac Objects, ed. Wolfe A. M. (University of Pittsburgh Press, Pittsburgh) p. 176
- 26) Sitko M. L., Junkkarinen V. T., 1985, PASP 97, 1158
- 27) Nilsson K., et al., 2010, A&A 516, A60
- 28) Usher P. D., 1979, AJ 84, 1253
- 29) Hudec R., et al., 2013, A&A 559, A20
- 30) Sillanpää A., et al., 1988, ApJ 325, 628
- 31) Villforth C., et al., 2010, MNRAS 402, 2087
- 32) Valtonen M. J., et al., 2010, ApJ 709, 725
- 33) Whitmire D. P., Matese J. J., 1981, Nature 293, 722
- 34) Gaskell C. M., 1983, in Quasars and gravitational lenses, ed. Swings J. P. (Universite de Liege) p. 473
- 35) Lehto H. J., Valtonen M. J., 1996, ApJ 460, 207
- 36) Sundelius B., et al., 1996, in Blazar Continuum Variability, eds. Miller H. R., Webb J. R., Noble J. C. (As-

- tronomical Society Pacific, San Francisco) p. 99
- 37) Sundelius B., et al., 1997, ApJ 484, 180
 - 38) Valtonen M. J., et al., 2007, Bull. Am. Astron. Soc. 39, 942
 - 39) Valtonen M. J., 2007, ApJ 659, 1074
 - 40) Valtonen M. J., et al., 2008, Nature 452, 851
 - 41) Arzoumanian Z., et al., 2014, ApJ 794, 141
 - 42) Klein A., et al., 2016, Phys. Rev. D 93, 024003
 - 43) Valtonen M. J., et al., 2011, ApJ 742, 22
 - 44) Valtonen M. J., et al., 2016, ApJ 819, L37
 - 45) Zeyher A., 2016, <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/astronomers-gauge-spinin-black-hole-duo-0329201643>
 - 46) Czerny B., et al., 2011, MNRAS 415, 2942
 - 47) Walton D. J., et al., 2014, ApJ 788, 76
 - 48) Agis-González B., et al., 2014, MNRAS 443, 2862
 - 49) Valtonen M. J., Ciprini S., Lehto H. J., 2012, MNRAS 427, 77
 - 50) Tanaka T. L., 2013, MNRAS 434, 2275
 - 51) Qian S. J., 2015, Res. Astron. Astrophys. 15, 687
 - 52) Miller H. R., et al., 1976, AJ 81, 298
 - 53) 定金晃三, 松本桂, 2005, 天文月報 98, 567
 - 54) Arimoto J., et al., 1997, PASP 109, 300
 - 55) Ciprini S., et al., 2007, Memorie della Società Astronomica Italiana 78, 741
 - 56) Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A., 1973, Gravitation (W. H. Freeman and Company, San Francisco) p. 876

**General Relativity Centenary Firework
—The Predicted Outburst of OJ 287
and Determination of the Spin of the
Primary Supermassive Black Hole
Katsura MATSUMOTO, Naoto KOJIGUCHI,
Taku KAMIBETSUNAWA, Yuki SUGIURA and
Kozo SADAKANE**

*Astronomical Institute, Osaka Kyoiku University,
4-698-1 Asahigaoka, Kashiwara, Osaka
582-8582, Japan*

Abstract: OJ 287 is a unique quasar characterised by its repetitive outbursts recurring approximately every 12 years, which is explained by a binary system of two supermassive black holes (BHs). Incorporating effects of general relativity and spin of the primary BH, an improved orbital model of the system predicted the up-coming outburst to occur in December, 2015. We intensively made photometric observations of the object as a part of an international campaign and succeeded in determining the accurate timing of the 2015 outburst and in obtaining the spin parameter of the primary BH.