

Nature 論文 (2008 年 4 月 17 日号) の解説 原文： M.Valtonen
タイトル： 一般相対性理論を支持する新しい証拠 (訳文)

まとめ

天文学者たちは、2つのブラックホールがお互いのまわりを回っている連星ブラックホールで、重い方のブラックホールが宇宙のなかで最も大質量のブラックホールであるという天体を発見したと報じた。その系では、第一ブラックホールの周りをより質量の小さい別のブラックホールが軌道運動しており、そのことが第一ブラックホールの質量を正確に決定することを可能にした。結果として得られた第一ブラックホールの質量は、太陽の 180 億倍もあった。この報告は、フィンランドのトゥルク大学の M. バルトネン博士を代表とする天文学者たちによって Nature 4 月 17 日号のレターに発表された (文献 1)。その結果で一番興味ある点は、連星ブラックホール系という性質を利用して、アインシュタインの一般相対性理論を連星ブラックホールの系に適用することに成功し、彼の重力の理論を非常に強い重力場の中で歴史上初めて検証したことである。結果はアインシュタインの理論と測定精度の範囲内で一致している。

OJ 287 とは

かに座の方向で、われわれから 35 億光年の距離にあるレーザー天体 (訳注：明るさが激しい時間的変動を示す活動銀河核。クエーサーもその中にも含まれる。) OJ 287 は、連星ブラック

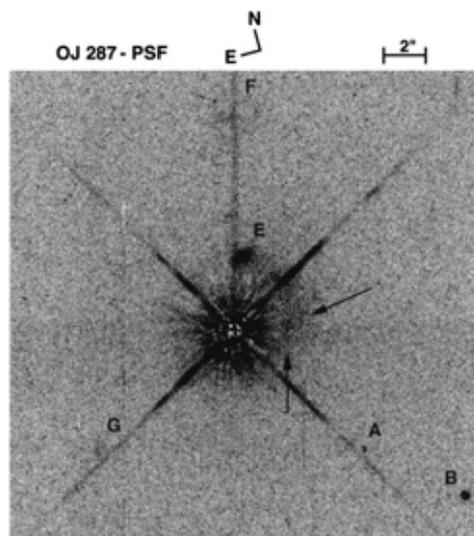


図 1 ハッブル宇宙望遠鏡(HST)によるレーザーOJ 287 の写真。非常な遠方にあるため HST を使っても詳しい構造はわからない。4 本見える直線状の筋は HST の副鏡を支持する棒による散乱光である。出典： Yanny et al. 1997, Astrophysical Journal, 484, L113

ホール系によってエネルギーを供給されている。距離は非常に遠いが、OJ 287 はレーザーとしては比較的近距离にあり、他の多くのクエーサーに比べると詳しい研究がされてきた。

この天体の特異な点は、約 12 年の間隔で 1 回当たり 2 個のパルス状の急激な増光現象を伴う規則的な変動が見られることである。この事実から、OJ 287 は 2 個のブラックホールから成るシステムであることが 1988 年に示唆された（文献 2）。この示唆によって研究が進み、パルスの到着時刻を预言する理論モデルが作られるようになった。预言された最初のパルスは 1994 年と 95 年に観測され、次の周期の最初のパルスは 2005 年に観測された（文献 3）。その後モデルは精密化し、この周期の 2 回目のパルスは 2007 年 9 月 13 日に観測されることが预言された（文献 4）。クエーサーの出すパルスは预言不能な現象の代表例としばしば言われており、この预言の当否は理論に対する最も厳しい試練とみなされた。

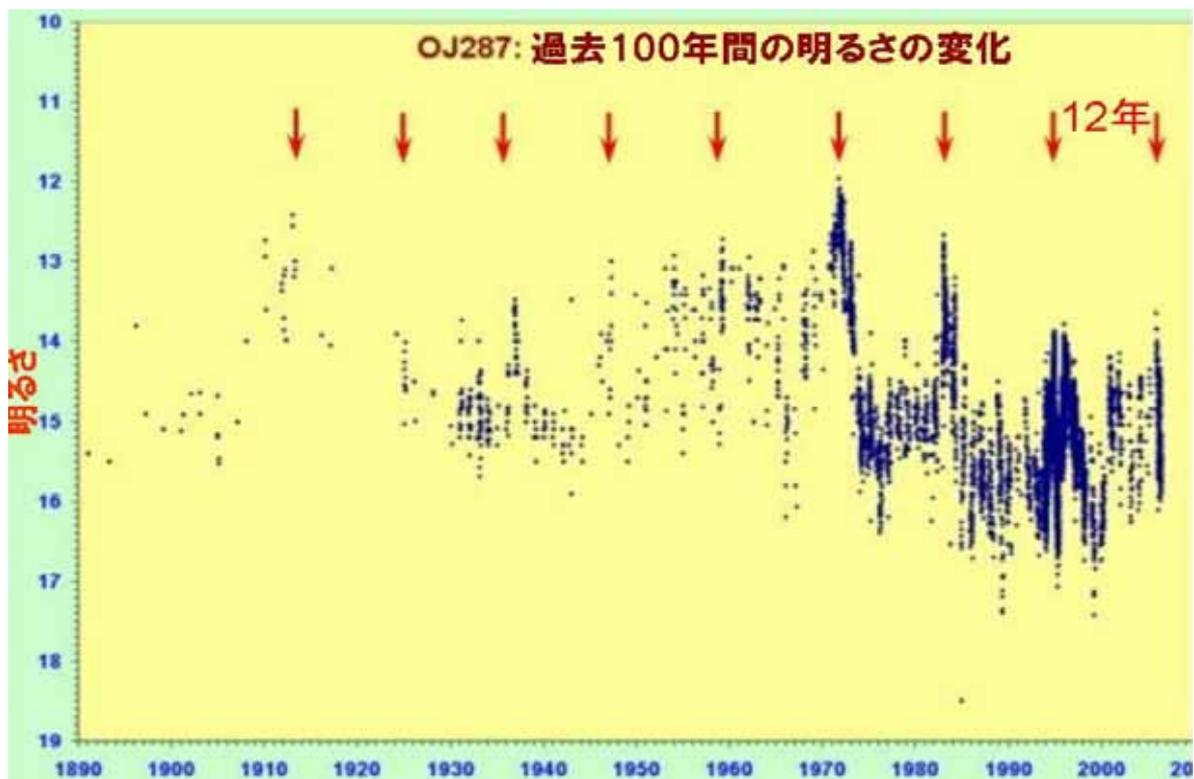


図 2 過去 115 年間に観測された OJ 287 の明るさの変化。横軸は西暦、縦軸は可視光での明るさを表している。1970 年以前はまばらな観測しかないが、1970 年以後はほぼ 12 年おきに 2 回ずつのパルス状の急激な増光が観測されている。このような例は他に知られていない。

2007 年秋の観測

OJ 287 を 9 月に観測することの最大の問題は、この時期にあつては OJ 287 は日の出直前に東の地平線から昇ることである。つまり、太陽によって空が明るくなる前に観測するチャンスは一日にたったの 30 分ほどしかないのである。しかし、チャンスは地球の自転に伴って毎日 1 回やってくる。日の出の時間は地球上を西に行くほど遅くなるから、異なる経度にある複数

の望遠鏡を使えば観測のチャンスを大きくすることが可能である。そこで、地球上のいろいろな場所にある望遠鏡と天文学者を組織して、ひとつのネットワークを作ることにした。OJ 287 の最初の観測は日本の東の地平線から天体が昇る時刻に日本（[訳注：大阪教育大学](#)）で行われた。その約 1 時間後に OJ 287 は中国の観測者の視界に入る。続いて東および西ヨーロッパ（トルコ、ギリシャ、ポーランド、フィンランド、イギリス、そしてスペイン）の天文学者が観測を引き継ぎ、締めくくりは大西洋上カナリー諸島の観測者が行う。10 カ国の総計 25 人以上の天文学者がこの観測キャンペーンに参加した。主要な参加者の多くは、自分の望遠鏡を使うアマチュア天文家である。プロの天文学者の使った望遠鏡もほとんどは小口径のものであった。2.5 メートルクラスの中口径の望遠鏡はカラ アルト望遠鏡（ドイツ）と ノルディック望遠鏡（デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェイ、スウェーデン）の 2 台だけであった。これら 2 台の望遠鏡はスペインとの共同で運用されている。

結果

この観測キャンペーンは成功をおさめた。9 月初旬から 10 月 20 日までの間の時期に、合計 100 回以上の観測がなされた。OJ 287 からのパルスは予定通り 9 月 13 日に検出された。2 本の中口径望遠鏡を使った偏光観測がその時に行われ、この時の偏光の特性はまさに予期されたものだったことが確認された。9 月 13 日の前後に見られた他のどのパルスにもそのような偏光特性を示すものは無く、このことから連星ブラックホールのモデルが強く支持される結果となった。

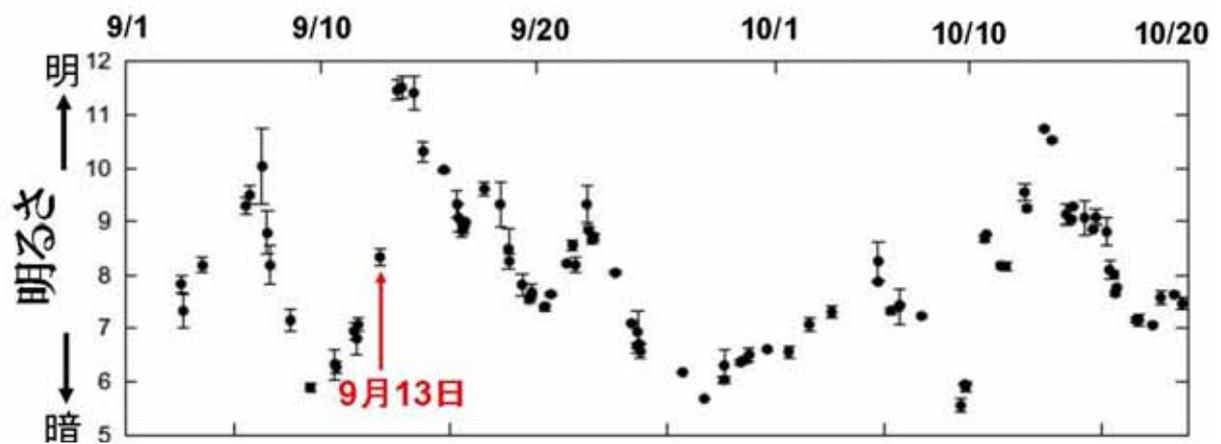


図 3 今回の論文に使われた OJ 287 の観測データ。2007 年 9 月の始めから 10 月 20 日までのデータであるが、9 月 12 日から 14 日にかけて急激な増光が見られる。これが予言された 2 回目のパルスである。この中に大阪教育大学の観測が 11 点含まれている。出典：文献 1

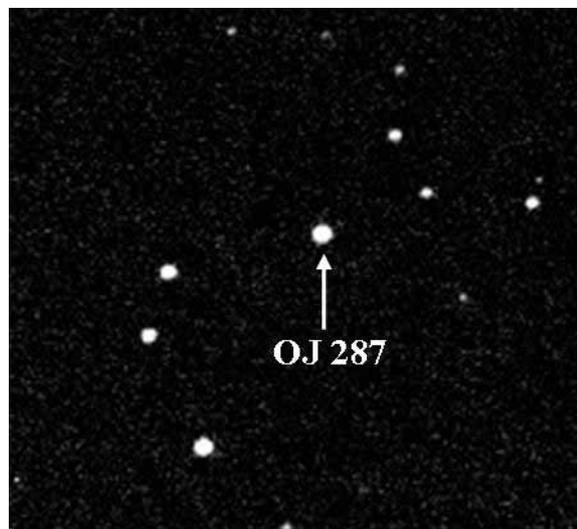
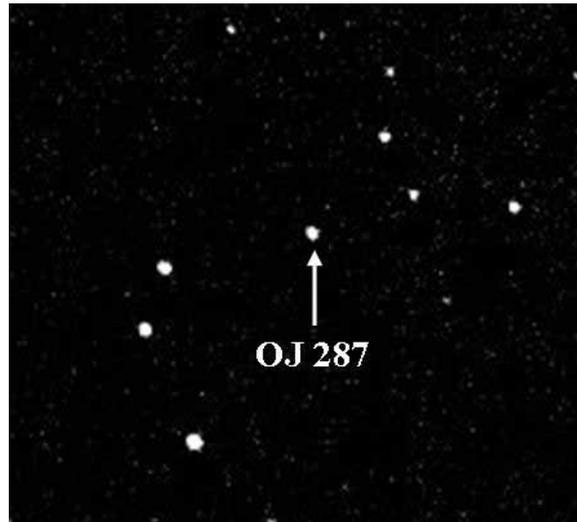


図4 大阪教育大学の51cm反射望遠鏡で得られたOJ 287の観測画像。中央の天体がOJ 287である。上は2007年1月8日、下は2007年9月14日(図3でもっとも明るくなった時)の観測。下ではOJ 287の明るさは上の場合より15倍以上明るくなっている。

明らかになったこと

モデルが分かると、次の興味は“なぜそれが重要なのか？”という点に移る。近接する連星ブラックホールの発見はそれ自体が重要であるが、さらに別の結論を導くことを可能にする。たとえば、大きい方のブラックホールの質量を非常に正確に測定することが可能になる。OJ 287の場合には太陽質量の180億倍という結果になった。以前に行われた研究から、クエーサーの中にはこの程度の質量までのブラックホールが存在することは知られていたが(文献5)、今回の結果はその事実の直接的な確認として最初のものとなった。クエーサーの中心部にあるブラックホールの質量を正確に測定することは極めて困難であるが、今回の場合には2個のブ

ブラックホールからなる系であるということが決め手となった。

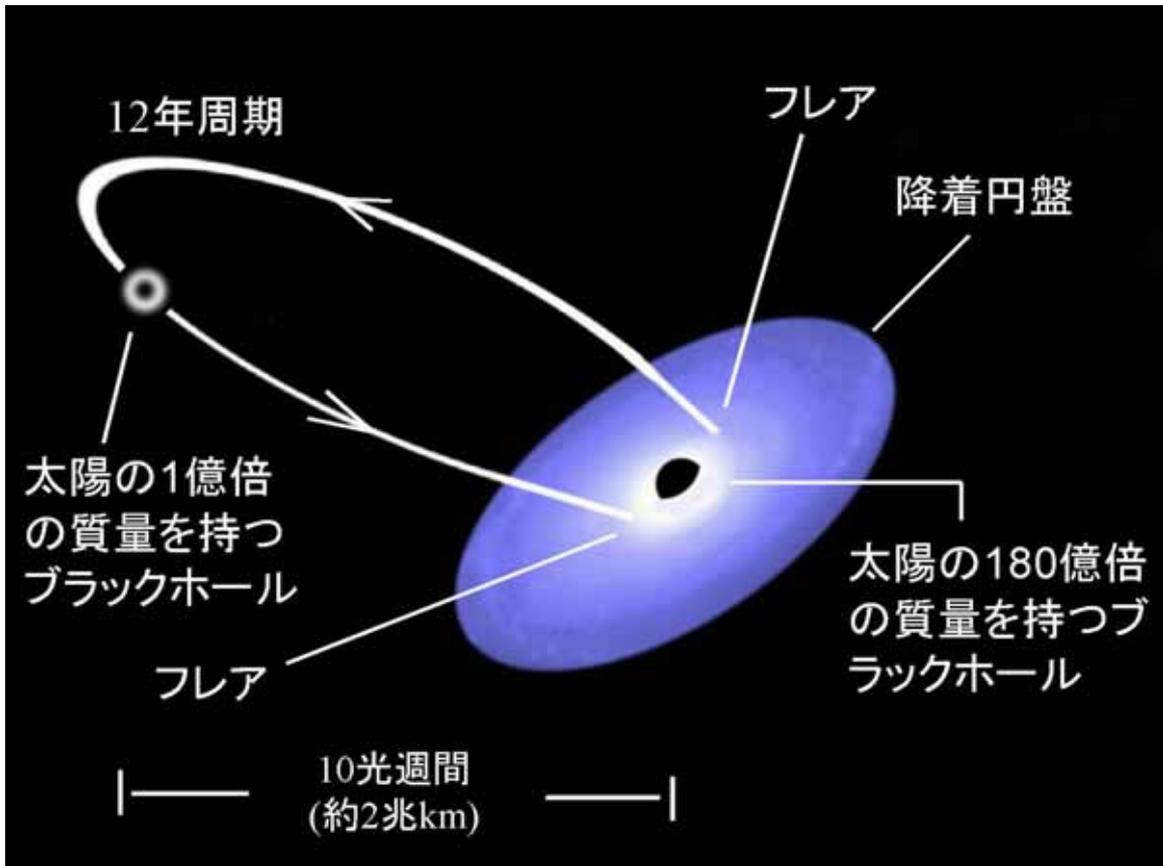


図5 OJ 287 のモデル図。太陽の 180 億倍もの質量をもつ超巨大ブラックホール(第一天体)のまわりを、太陽の 1 億倍程度の質量をもつ巨大ブラックホール(第二天体)が楕円軌道を描きながら回っていると考えられている。超巨大ブラックホールのまわりにはガスでできた降着円盤が渦巻いており、巨大ブラックホールが降着円盤に突っ込むたびに、激しい衝突によって 2 回の急激な増光を引き起こすのだらうと想像されている。遠方にいる我々は、この急激な増光(パルス)が起きる時刻を観測することによって第二天体の動きを追跡でき、結果としてその軌道を正確に決定することが可能となる。2008 年 4 月 11 日の改訂版。(原作 M. Valtonen)

相対性理論の検証

さらに面白いことは、これら 2 個のブラックホールの中に働く重力が圧倒的に強いことである。重力の理論をこのように強い重力場の中で検証する機会はいまだになかったことである。このような状況では、アインシュタインの一般相対性理論で言われる時空の歪みが全面的に登場し、他の理論の予言とはまったく異なった様相となる。時空の歪みを考慮したモデルと考慮しないモデルの 2 種類を計算し、OJ 287 のパルスの到着時刻の観測結果と比較する検討を行った。結果として、アインシュタインの理論で OJ 287 連星ブラックホール系の軌道の振る舞い

が正しく再現できることが示され、彼の理論が支持されることになった。現在の誤差の大きさはおよそ 10% であるが、将来の観測、特に 2016 年 1 月と予想される次のパルスの到来を観測することで改善が可能である。

かつて行われた重力の理論の検証はすべて弱い重力場に依存しており、観測データの別の解釈が可能であった。たとえば、連星系の軌道主軸の相対論的な歳差運動（[訳注：楕円軌道の軸の方向がゆっくりとずれていくこと](#)）は、それがあまり大きくなければ平坦な時空モデルでも説明可能である。ところが、OJ 287 に見られる軌道を一周するごとに 39 度という大きな歳差運動は、平坦な時空モデルで説明可能な範囲を大きく超えており、一般相対性理論の予言する時空の歪みが実際に存在することを強く示唆している。このことは同時に OJ 287 の主天体はまさしくブラックホールであり、平坦な時空の中に置かれた重い天体ではないことを示している。厳密に言えば、これまでブラックホールの発見と言われていたものは、すべて小さい空間の中に重い天体が閉じ込められていることを単に証明したに過ぎず、その空間の中に時空の特異点が存在することを示したものではなかった。その意味で今回の結果は宇宙に真のブラックホールが存在することを示した最初の例である。

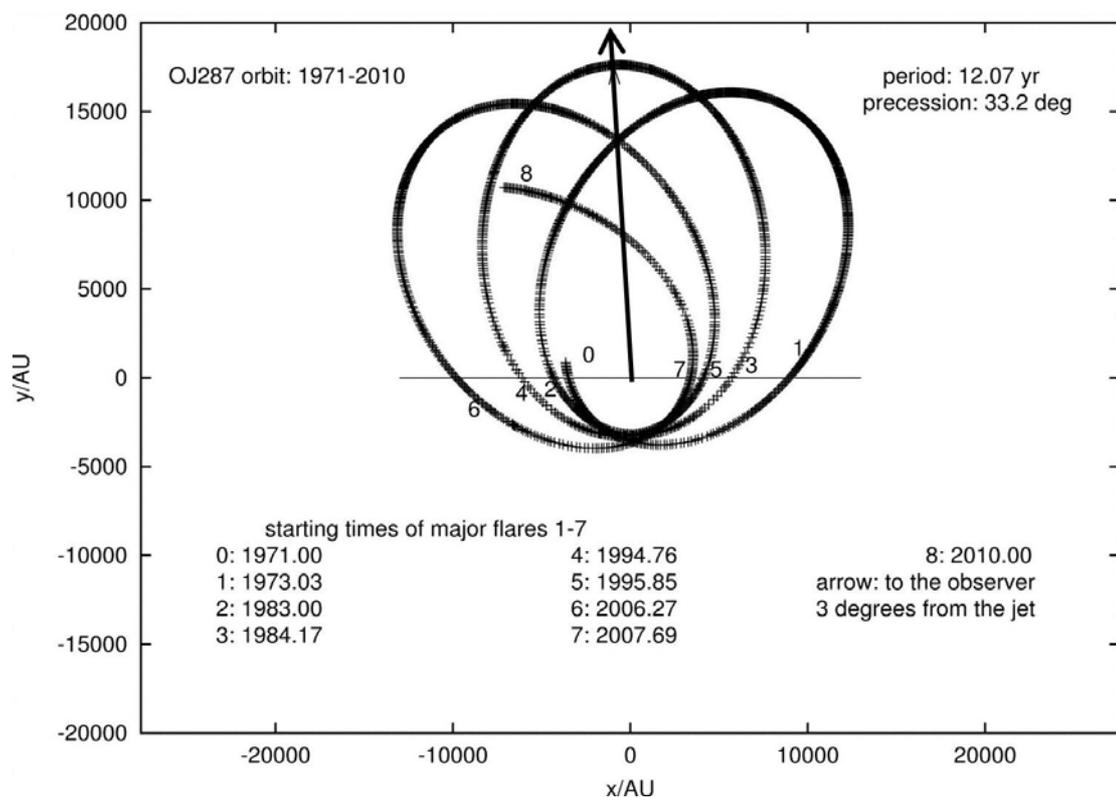


図 6 超巨大ブラックホールのまわりを回る巨大ブラックホールの軌道の変化の様子。おおまかには楕円軌道を描きながら、超巨大ブラックホールの強い重力作用によって、楕円軌道の軸の方向が図の上では右から左の方向へ少しずつずれていると推定されている。観測者（我々の銀河系）は上向きの矢印の方向にある。

出典： Valtonen et al. 2006, *Astrophysical Journal*, 646, 36

予言

この連星ブラックホール系は重力波を放射することで、一般相対性理論の予言通りの割合でエネルギーを失いつつあることが副産物として示された。今までのところ重力波の直接的な検出がなされていないことから、この結果は重要である。OJ 287 の観測から推定された重力波によるエネルギーの損失率はあらゆる天体の中で最大であり、このレーザーの電磁波によるエネルギー放射の総量に匹敵するものである。OJ 287 は今後 10 年以内に稼動する予定の重力波アンテナ LISA (訳注：一辺の長さ 500 万キロメートル の正三角形の頂点に置かれた 3 台の宇宙船の間の距離をレーザーを使って精密に測定し、重力波の検出を行う計画。NASA と ESA(ヨーロッパ宇宙機構) が共同で推進しており、2018 年頃の打ち上げが予定されている。) の主要な観測ターゲットになるであろう。

現在の宇宙論は連星ブラックホールを中心核に持つ多くの銀河の存在を予言しているので、連星ブラックホールを見つけたこと自体はそれほど驚くにはあたらない。逆に重要な問題は OJ 287 のような例がこれまで見つからなかったのはなぜなのか？ という点である。連星ブラックホールの持つ降着円盤は、主天体が太陽の 100 億倍以上の質量でなければ不安定であり (文献 4)、このような大質量のブラックホールは宇宙の中でめったに無いこと (文献 5) がおそらくその答えであろう。連星ブラックホールを中心核に持つ銀河は実際にはたくさん存在するが、OJ 287 の場合のような明確な信号を我々が受けていないだけというのが真相かもしれない。クエーサーの現象一般にとって降着円盤の存在は本質的に重要であり、連星ブラックホールの検出にとっては特にそうである。

OJ 287 の連星ブラックホールの発見は、連星系の証拠を見つけるため周期的な信号検出をめざして電波 (メツアホビ電波天文台) と可視光 (トウオラ天文台) の両方で 1980 年代に開始された長期的な観測プログラムの成果である。この確認は同じく 1980 年代に開始されたノルディック望遠鏡による偏光観測にも大きく依存している。

本研究は日本の文部科学省をはじめ各国の科学院、科学財団などからの財政支援を受けたものである。

訳： 定金晃三、 閲読： 福江 純、 作画協力： 勘田祐一 (大阪教育大学)

大阪教育大学の主な観測者： 鎌田麻里、溝口小扶里、石井優子、中岡正奈、勘田祐一、
山中雅之、濱岡慎也

引用文献

1. Valtonen,M.J.; Lehto,H.J.; Nilsson,K.; Heidt,J.; Takalo,L.O.; Sillanpää,A.;
Villforth,C.; Kidger,M.; Poyner,G.; Pursimo,T.; Zola,S.; Wu,J.-H.; Zhou,X.;
Sadakane,K.; Drozd,D.; Koziel,D.; Marchev,D.; Ogloza,W.; Porowski,C.;
Siwak,M.; Stachowski,G; Winiarski,M.; Hentunen,V.-P.; Nissinen,M.; Liakos,A.;
Dogru,S.

A massive binary black-hole system in OJ 287 and a test of general Relativity, Nature, April 17 (2008).

2. Sillanpää,A.; Haarala,S.; Valtonen,M.J.; Sundelius,B.; Byrd,G.G.
OJ287 – Binary pair of supermassive black holes, ApJ, 325, 628 (1988)

3. Valtonen, M.J.; Kidger, M.; Lehto, H.; Poyner, G.
The structure of the October/November 2005 outburst in OJ287 and the precessing binary black hole model, A&A,477,407 (2008)

4. Valtonen,M.J.
OJ287: A binary black hole system, RevMexAA(Conf.Ser.) (2008), in press

5. Vestergaard, M.; Fan, X.; Tremonti, C. A.; Osmer, P. S.; Richards, G. T.
Mass Functions of the Active Black Holes in Distant Quasars from the Sloan Digital Sky Survey Data Release 3 , ApJ, 674, L1 (2008)