

銀河中心の巨大ブラックホール連星の検出

須 藤 広 志

〈岐阜大学工学部人間情報システム工学科 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1〉

e-mail: sudou@cc.gifu-u.ac.jp

巨大ブラックホールを持つ銀河同士の合体の結果、銀河本体は合体していても巨大ブラックホールはまだ合体しておらず、二つの巨大ブラックホールが連星系をなしている可能性が示唆されている。その存在を明らかにするためには、巨大ブラックホールの軌道運動を捕らえることが直接的な検証になるが、そのため観測には、非常に高い精度で巨大ブラックホールの位置測定をしなければならない。これを実現してくれるのが相対 VLBI という観測手法である。私たちは 3C 66B という活動銀河核の電波源を相対 VLBI によってモニター観測し、その系統的な位置変化を世界で初めて捕らえることに成功した。この結果はまさに巨大ブラックホール連星の軌道運動が見えたと解釈できる。本稿では、その研究成果について報告する。

1. 銀河と巨大ブラックホール

現在、ほとんどの銀河の中心部には太陽の 100 万倍から 10 億倍程度の質量を持つ巨大ブラックホールが存在していると考えられている¹⁾。この巨大ブラックホールの周りにガスがある場合、そのガスが巨大ブラックホールに吸い寄せられて円盤状に落ち込んでいく過程で摩擦などによって高熱が発生し、銀河の中心核が X 線などで非常に明るく輝くことがある²⁾。このような現象を示す銀河を特に「活動銀河」と呼ぶ。その典型的な例としては、電波領域で激しいジェット現象を示す「電波銀河」などが挙げられる。

一方、銀河はその一生のうちで何度か衝突・合体を起こすことが、撮像・分光観測やコンピュータシミュレーションの結果などから分かってきている³⁾。銀河が合体を繰り返すと、最終的に巨大な楕円銀河になってしまうと予想されている⁴⁾。それでは、それぞれの銀河中心にある巨大ブラックホールは、この銀河衝突の結果どうなるのだろうか。

2. 巨大ブラックホール連星の形成

ほとんどの銀河が巨大ブラックホールを持つのであれば、合体を経験した銀河はその内部に二つの巨大ブラックホールを持っているはずである。これらのブラックホールは周りの恒星やガスと重力的な相互作用によって数億年程度の短い時間で銀河の中心部に落ち込み、互いに接近していくと予想されている⁵⁾。その過程で巨大ブラックホール間の距離が 1 光年程度になると、二つの巨大ブラックホールは互いの重力を感じ、共通重心の周りを連星（バイナリー）として回転し始めるはずである。これを巨大ブラックホールバイナリー (Super Massive Binary; SMB) と呼ぶ。

SMB がさらに接近して距離が 0.01 光年くらいまで縮まるとそこに一般相対論の物理が働き始め、SMB は「重力波」を放出しエネルギーを失っていく⁶⁾（このような重力波は銀河系内の「連星パルサー⁷⁾」でも検証されている）。重力波は、SMB の距離が縮まるほど非常に激しく放射されるので、最後はまさに一瞬で二つの巨大ブラックホールは共通重心へ到達し、そこでついに巨大ブ

ラックホールの合体が起こると考えられる。

3. 観測可能性

それでは、我々はこの巨大ブラックホールの合体を捕らえることはできないのだろうか。銀河本体の合体直後から巨大ブラックホール間の距離が1光年くらいになるときまで、そして同じく距離0.01光年くらいのときから巨大ブラックホールの合体まで、いずれも宇宙年齢から見ればほとんど一瞬のうちに終わってしまうと予測されている。したがって、巨大ブラックホールが合体する過程で最も観測されやすいのは、距離0.1光年くらいのSMBとして存在している時期のはずである⁵⁾。巨大ブラックホールが太陽質量の10億倍程度であったとすると、軌道周期は10年ほどになる。

この0.1光年という距離は、見かけ上非常に小さい。たとえば、距離1億光年という比較的近傍の銀河を観測した場合でも、0.1光年は角度にしてたったの0.0001秒角程度に過ぎない。そのため、今まで天文学者たちはSMBの存在を、間接的な示唆からしか議論することができなかった。たとえば、OJ 287という活動銀河では11年周期の電波や可視光の変光が発見され、これはSMBの軌道周期を表しているのではないかという指摘もされている⁸⁾。

4. VLBIによる観測

現在、あらゆる天文学の観測装置の中で、超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometry; VLBI^{*1)}) は最も高い角度分解能を実現することができる。たとえば周波数8 GHzでは基線長10000 km程度の場合、VLBIの角度分解能は0.001秒角となる。天体がほぼ点源であれば、その位置を空間分解能の数十分の1程度の精度で決定することもできるので、原理的には上記の0.0001秒

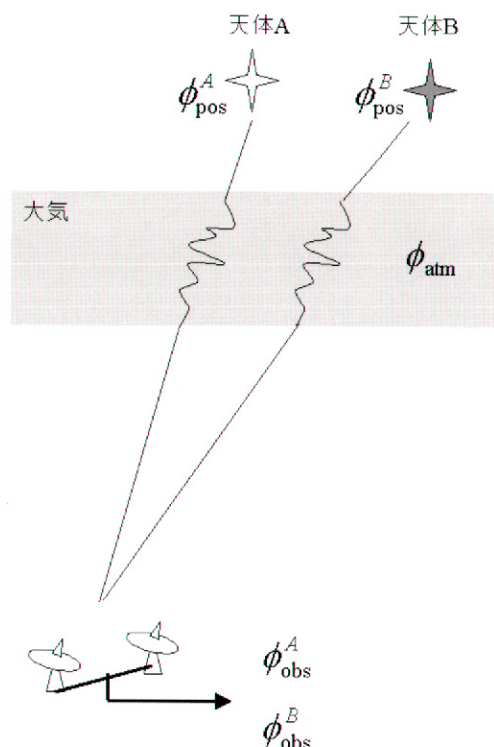


図1 相対VLBIの原理図。二つの天体電波源 A、B における真の位置を表す相関位相をそれぞれ ϕ_{pos}^A , ϕ_{pos}^B 、2天体に共通な大気ゆらぎに起因する位相 ϕ_{atm} とすると、各天体で観測される位相はそれぞれ $\phi_{\text{obs}}^A = \phi_{\text{pos}}^A + \phi_{\text{atm}}$, $\phi_{\text{obs}}^B = \phi_{\text{pos}}^B + \phi_{\text{atm}}$ と書ける。これらの観測された位相の差を取ると、 $\phi_{\text{obs}}^A - \phi_{\text{obs}}^B = \phi_{\text{pos}}^A - \phi_{\text{pos}}^B$ となり、大気ゆらぎの項を除去することができるとともに、二つの電波源の相対的な位置関係が得られる。

角というわずかな角度の位置変化でも検出可能である。

ところが、VLBIで普通の観測を行うと、地球の大気中に含まれる水蒸気による電波位相のゆらぎが原因で、天球面上での電波源の位置の情報が失われてしまうという欠点がある。それゆえ従来のほとんどのVLBI観測は天体の構造を得ることにだけに使われ、VLBIの持つ高い位置決定精度をほとんど活かすことができていなかった。

*1 複数の電波望遠鏡で天体を同時に観測し、各望遠鏡で受信された電波を干渉させることで、非常に高い空間分解能が得られる。空間分解能は望遠鏡間の距離（基線長）に比例して向上する。

この邪魔な大気によるゆらぎを取り除くため、「相対 VLBI (位相参照 VLBI)」という技術が電波天文学者たちの間で注目されている⁹⁾。これは、観測天体とその近傍(数度以内)にある別の参照天体を同時に VLBI で観測し、観測天体と参照天体の位相差を取ることで、二つの天体に共通な大気ゆらぎを相殺しようとする方法である(図 1)。大気のゆらぎを効果的に取り除くためには、できるだけ観測天体の近くに参照天体を見つけることが重要である。また、実際は観測天体の位置を参照天体の位置を基準にして測るので、参照天体はできるだけ遠方であってあまり激しく位置変動を起こさず、かつ単純な構造をしていることが求められる。このように、相対 VLBI 観測を行うためには、なるべく条件の良い参照天体を探すことが重要となってくる。

5. 電波銀河 3C 66B の相対 VLBI 観測

当時東北大学の大学院生であった私は、国立天

文台の井口 聖氏、宇宙科学研究所の村田泰宏氏、指導教官でもあった東北大学の谷口義明氏とともに、この相対 VLBI を使って SMB を検出することができないかと考えた。3C 66B は銀河系から 2 億光年ほど離れた巨大な楕円銀河で、銀河の中心核からは双方向に強力なジェットが放射されている典型的な電波銀河でもある¹⁰⁾。幸運なことに、この銀河の見かけ上ごく近傍(6 分角)に、3C 66A という別の活動銀河が存在している。3C 66A は 3C 66B よりも 20 倍ほど遠方にあり、位置の基準点として利用できる。

私たちは 3C66B の SMB 探査を実行すべく、アメリカ国立電波天文台の Very Long Baseline Array (VLBA) による相対 VLBI 観測提案を行った。この提案は幸運にも採択され、1 年半にわたるモニター観測を行うことができた。VLBA とは、北アメリカ・ハワイ・バージン諸島の各地に口径 25 m の電波望遠鏡を合計 10 台設置した最大基線長 8600 km を誇る世界最高性能の VLBI ネットワークである。周波数 8 GHz 以下では 3C66B と

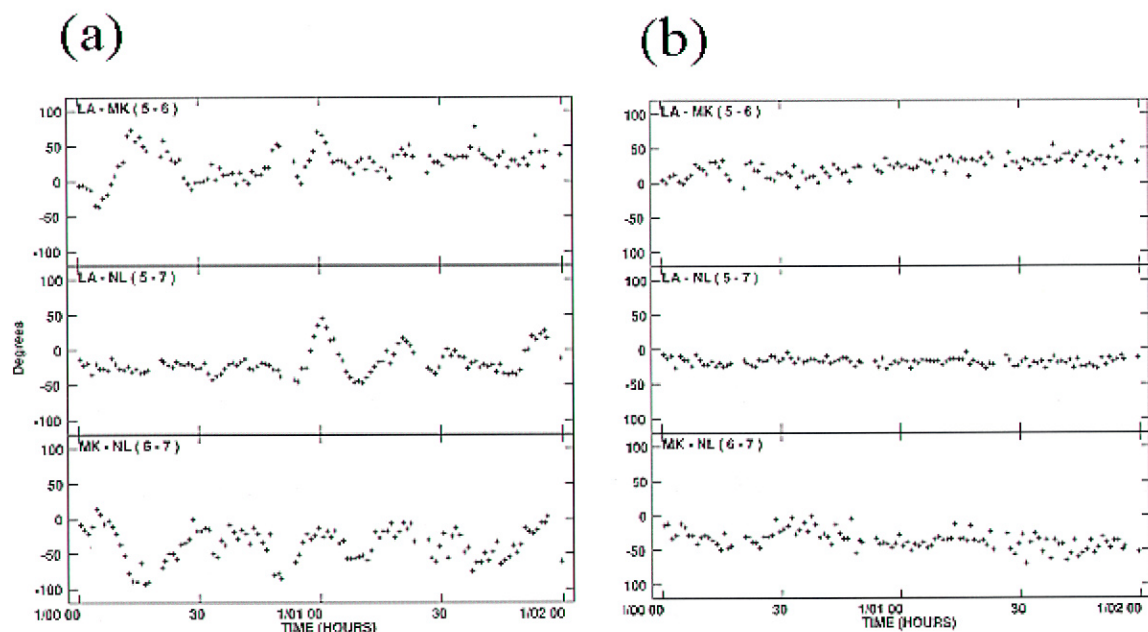


図 2 3C 66B の相関波位相の 2 時間にわたる時間変動。(a) 大気ゆらぎ補正前、(b) 大気ゆらぎ補正後。三つの基線の結果で、LA,NL,MK はそれぞれロスアラモス、ノースリパティ、マウナケアの各 VLBA 観測局を表す。

3C 66A が VLBA の電波望遠鏡の視野に同時に入るため、非常に効率が良く大気ゆらぎの影響を取り除くことができる2天体同時観測が可能である(普通は2天体が同時に視野に入らないため、数十秒間隔で交互に観測することで相対 VLBI を行う)。

2 GHz および 8 GHz の二つの周波数によるモニター観測が 2001 年 3 月から 2002 年 6 月にかけて実行された。天体間の角距離が非常に近いこともあって、懸念であった大気のゆらぎの影響は十分な精度で補正することができた。図 2 は大気ゆらぎの補正前と補正後における 3C 66B の 2 GHz における相関位相の時間変動を示している。数分スケールの大気による激しい位相変動がきれいに補正され、熱雑音的なゆらぎと天体構造に起因するゆっくりした時間変動だけが残っていることが分かる。

表紙の右側写真(図 3)は 3C 66B の 2 GHz における電波写真で、中央の明るい部分がジェットの本元(「電波コア」と呼ばれる)であると考えられ、そこから北東に向かってジェットが伸びている様子が得られた。このようなジェットは巨大ブラックホールの周りにある円盤状の高温プラズマ(「降着円盤」と呼ばれる)のごく近傍で発生していると考えられるので、電波コアの位置は巨大ブラックホールのおおよその位置を反映していると思われる。したがって、この電波コアの位置を正確に計測し、その位置の時間変動を調べることによって、巨大ブラックホールの運動を知ることができるはずである。

図 4 に 2 GHz で得られた電波コアの位置変化の結果を示す。電波コアは天球面上で楕円状に並んでいるように見える(図 4a)。これを、等速円運動を斜めから見たというモデルでフィットすると、時間変化もきれいに再現できる(図 4b, c)。また、8 GHz による同様の観測も行っており、こちらも 2 GHz のものより軌道半径は小さいが周期は等しい楕円運動を検出している。このような

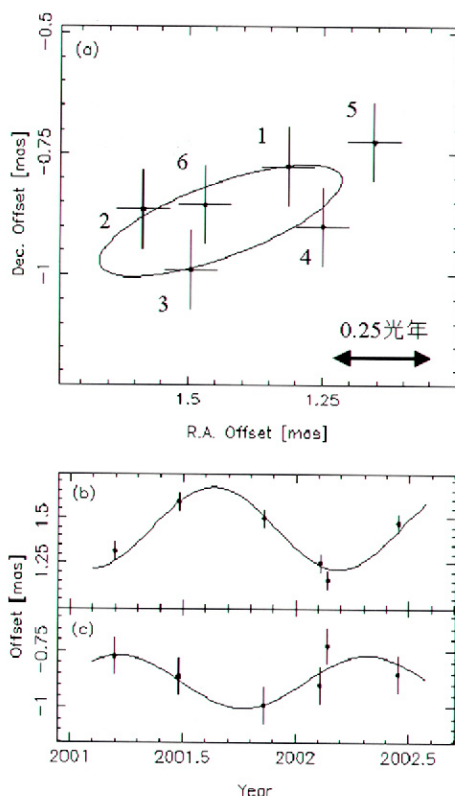


図 4 2 GHz における電波コアの時間変化¹³⁾。(a) 天球面上での位置変化、(b) 赤経方向の時間変化、(c) 赤緯方向の時間変化。実線は楕円運動によるフィットの結果を示す。(a) 中の数字は観測エポック順を示す。また mas=ミリ秒角のこと。

電波コアの系統的な運動の検出は、非常に近い角距離にある天体ペアを見つけ出すことで従来の観測より精度を大幅に向上させたことの賜物であり、今回の結果が世界で初めてである。

私たちは、この1年スケールという短い周期の軌道運動は、SMBの軌道運動に伴うものであれば辻つまが合うと考えた。実際に、二つの周波数で得られた電波コアの軌道運動のサイズや位置角の関係は、SMBモデルから矛盾なく説明することができる。また、ジェットは1本しか出ていないように見えるので、ジェットは片方の巨大ブラックホール(ここでは軽い方と仮定する)から出ていると考えられる。

高い周波数ほどブラックホールに近い部分が見通せることから¹¹⁾、8 GHz における電波コアの運動の方が巨大ブラックホール自体の運動をより強く反映している。よって、SMB の軌道半径の最大値として 8 GHz における電波コア運動の長軸半径 45 マイクロ秒角^{*2} = 約 0.05 光年が得られる。二つの周波数で平均した楕円運動の周期は 1.05 年であるので、ケプラーの第 3 法則を使ってこの巨大ブラックホールの合計質量を見積もることができ、その結果、最大値としておよそ 50 億太陽質量という値が得られた（二つの巨大ブラックホールの質量比 0.1 を仮定）。

6. 今後の SMB 研究の発展

3C 66B に SMB が存在しているとすれば、ほかにも非常に多くの活動銀河に SMB が存在している可能性がある。SMB の観測例を増やし、SMB の基本的な性質を明らかにすることができれば、銀河の新しい側面が次々に明らかになってくるはずである。たとえば、今まで謎であった巨大ブラックホールの成長過程と銀河合体の関係、また重力波の物理過程を介して一般相対論への寄与へつながる可能性も秘めている。

したがって、我々の次のステップとして、3C 66B 以外にも SMB が存在することを証明する必要がある。今回の観測で明らかになったように、相対 VLBI を使った電波コアの軌道運動のモニターは、その一つの有力な方法と言える。国立天文台の所有する VERA ネットワーク^{*3} は相対 VLBI 観測に特化したユニークなシステムであり、SMB 探しに大きな威力を発揮すると期待している。また宇宙科学研究所などで計画されている宇宙空間 VLBI システムである VSOP-2^{*4} でも、相対 VLBI を行う機能を搭載することが検討されているとのことであり、もし実現すれば非常

に高い位置精度の観測が可能となるはずである。

もう一つの VLBI による SMB 検出の試みとしては、ジェットの周期的な強度変化を捕らえることが挙げられる。ジェットは降着円盤やブラックホールの回転軸に垂直に放出されると考えられているので、短い時間スケールで見れば基本的にジェットの向きは不変であるはずだが、ジェットを出している巨大ブラックホール自体が軌道運動している結果、その速度がジェットの速度に加わり、ジェットの方向は巨大ブラックホールの軌道の位相によって数度だけ変化しうる。ジェットは光速に非常に近い速度を持っているため相対論的なビーミング効果が強く効き、このわずかな方向の変化がジェットの明るさを数十%も変化させてしまうことが計算される。この強度変動の周期は巨大ブラックホールの軌道周期をじかに表し、振幅は巨大ブラックホールの質量の情報を間接的に含んでいる。

さらにも軌道周期が徐々に短くなっていく現象を捕らえることができれば、先に述べた連星パルサーと同様に SMB から重力波が放出されている現場をつぶさに観測したことになる。

もちろん、このようなジェットの強度モニターはすでに多くの電波望遠鏡で数十年も行われ続けている¹²⁾。しかしこれらのモニターの多くは単一鏡によるもので、空間分解能が悪いことからジェットの数百万光年スケールにわたる広い範囲をすべて積分したデータとなっているため、ジェット自体の物理的変化の影響などを含んでいる。上記のような巨大ブラックホールの軌道運動に起因する周期変化だけを切り出すには、高い空間分解能を持つ VLBI でブラックホールの近傍のみを観測することが不可欠なのである。

現在、国立天文台を中心とする研究グループ

*2 マイクロ秒角 = 10^{-6} 秒角で、月面上では 2 mm 程度に相当する。

*3 詳しくは <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/index-J.htm/>

*4 詳しくは <http://wwwj.vsoap.isas.ac.jp/> または <http://vsop.mtk.nao.ac.jp/> を参照。

が、岐阜大学や山口大学などと共同で日本の電波望遠鏡を超高速度通信ネットワーク（国立情報学研究所のスーパー SINET）で結び、大容量データを一気に記録・処理することのできる新しい VLBI システム「e-VLBI」を構築している。このシステムは従来の VLBI のテープ記録方式に比べて周波数帯域幅が 10 倍以上となるために、今まで検出不可能であった暗い天体でも十分な感度で検出できる。この e-VLBI ならば、活動銀河の大部分を占める「弱電波活動銀河核（Radio-Quiet Active Galactic Nuclei）」において SMB 探査を実行するのに最適な装置と考えている。そしてこれらの結果を下地に、完成の待たれる ALMA^{*5} によって巨大ブラックホール合体の物理過程をさらに深く追求できるのではないかと、大きく期待している。

謝 辞

本稿は、筆者が東北大学でまとめた博士論文の一部を元に作成したものです。本稿をまとめるにあたり、有益なご助言をいただいた岐阜大学・若松謙一氏および高羽 浩氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Kormedy J., Richstone D., 1995, ARA&A 33, 581
- 2) Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, A&A 24, 337
- 3) Lynden-Bell D., 1969, Nature 223, 690
- 4) Ostriker J. P., Tremaine S. D., 1975, ApJ 202, L113
- 5) Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J., 1980, Nature 287, 307
- 6) Thorne K. S., Braginskii V. B., 1976, ApJ 204, L1
- 7) Hulse R. A., Taylor J., 1975, ApJ 195, L51
- 8) Sillanpää A., et al., 1988, ApJ 325, 628
- 9) Alef W., 1989, in NATO ASI Ser., Very Long Baseline Interferometry, Techniques and Applications, eds. Felli M., Spencer R. E., p. 261
- 10) Laing R. A., Riley J. M., Longair M. S., 1983, MNRAS 204, 151
- 11) Königl A., 1981, ApJ 243, 700
- 12) Aller M. F., Aller H. D., Hughes P. A., 2003, ApJ 586, 33
- 13) Sudou H., Iguchi S., Murata Y., Taniguchi Y., 2003, Science 300, 1263

Detection of a Supermassive Black Hole Binary in an Active Galactic Nucleus

Hiroshi Sudou

Faculty of Engineering, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu 501-1193, Japan

Abstract: Supermassive black hole binaries may exist in active galaxies such as radio galaxies. Using a technique of phase-referencing VLBI, we detected a systematic elliptical motion of the radio core during our imaging monitoring of the radio galaxy 3C66B. This result strongly indicates the orbital motion of a supermassive black hole binary. We expect that new radio interferometry facilities such as VERA, VSOP-2, and ALMA will begin a new era in study of supermassive black hole binaries.

*5 詳しくは <http://www.nro.nao.ac.jp/lmsa/index.html/> を参照。