

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月28日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21340044

研究課題名（和文） ミリ波サブミリ波による巨大バイナリーブラックホールの観測的研究

研究課題名（英文） Observational study on the Massive Binary Black Holes at milli- and submilliwavelengths

研究代表者

井口 聖（IGUCHI SATORU）

国立天文台・電波研究部・准教授

研究者番号：10342627

研究成果の概要（和文）：ミリ波帯での高精度モニター観測によって、巨大銀河の中心から周期的に時間変化する強度変動を発見することに成功した。この結果とこれまでの観測結果から、巨大銀河の中心にはバイナリーブラックホールが存在する可能性を示唆できた。ブラックホール同士の合体は宇宙空間において最も壮大な自然現象の内の1つである。さらに、本結果は超巨大ブラックホールへの成長過程の中でブラックホール衝突が深く関わっている可能性を示したと考える。

研究成果の概要（英文）：By our high-precision monitoring observations at millimeter wavelengths, we successfully detected the periodic variation a periodic flux variation from the center of a giant galaxy. This and our past observations provided possible evidence that binary black holes exist in the center of giant galaxies. The black hole merger is one of the most spectacular natural phenomena in the universe and our observational results show that the black hole collisions may have important implications for the formation of a supermassive black hole in the evolution process.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学、天文学

キーワード：電波天文学、サブミリ波、バイナリーブラックホール

1. 研究開始当初の背景

巨大銀河形成を研究する上で、銀河と銀河の衝突現象を捕まえることは非常に重要である（Weil & Hernquist 1996, ApJ, 460, 101）。銀河の衝突が終わりに近づくと、その銀河は巨大楕円銀河になると考えられている

（Sanders et al. 1988, ApJ, 325, 74）。これまでの研究で、銀河の中心には“太陽の数千万倍以上の質量を持つ”巨大なブラックホールが存在することがわかってきている。そして、このような衝突銀河の中心では、それぞれの銀河の中心にあったブラックホール

(BH)同士の衝突も期待され、この仮説における銀河進化過程では、この衝突銀河の中心には2つのブラックホール（バイナリーブラックホール：BBH）が存在することが示唆されている（Begelman et al. 1980, Nature, 287, 307）（3 つ以上も有り得る）。2003 年、本研究チームが、電波銀河 3C66B の中心核の公転運動を観測することで、この中心に2つのブラックホールが存在することを示すことに成功した（米国の科学雑誌「サイエンス」に掲載）。これにより、巨大楕円銀河の由来の1つと考えられている銀河の Merger 説を確証する手がかりを得たと考えている。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、ジェットとBBHの関係、そしてエネルギーの供給源となるディスクとブラックホールの関係から、“銀河の合体現象のメカニズム”、さらには“銀河形成”までを解明することを目指す研究を行うことである。興味あることに、これまでBBHの研究を行ってきた電波銀河3C66Bは、早期型銀河であった。典型的な早期型銀河の形状は、楕円形状をしたディスクを持ち、両サイドジェットが対象に数十 kpc にわたって伸びている。こうした背景から、我々は、早期型銀河は、“銀河中心核の成長と進化のメカニズム”を説き明かす重要なプローブに成り得ると考えた。

本研究では、観測速度を向上するために観測精度（感度）のさらなる向上を目指したミリ波サブミリ波における高精密モニター観測法の開発を行う。そして、ユニークな天体である3C66Bのみならず、さまざまな早期型銀河を中心に、ミリ波サブミリ波での高精密モニター観測を実施することで数多くのBBHの検出を目指す。

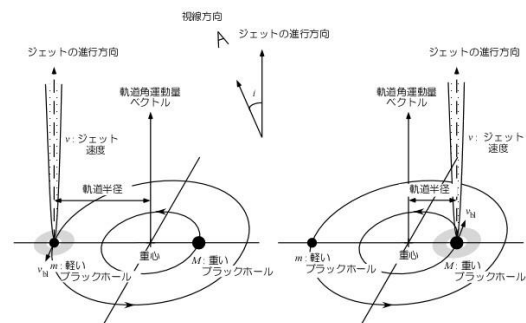
最終的には、早期型銀河シルエットディスクのガスの物理状態やAGNの活動性との関係などを統計的に調べ、AGNに付随する分子ガス円盤/リングの特性について明らかにし、巨大銀河形成メカニズムを解明することまで辿り着けることを目指す。そして、ブラックホール・ディスク・ジェットといった銀河のエンジンとガソリン（エネルギー供給源）の関係を解き明かしたい。

3. 研究の方法

電波や光による活動銀河OJ 287 の11年周期のバースト（Sillanpaa et al. 1988, ApJ, 325, 628; Valtaoja et al. 2000, ApJ, 531, 744）などBBHの存在を示唆する結果が報告されている中、研究代表者が推し進めてきたミリ波サブミリ波精密モニター観測による3C66Bの観測結果は、BBHの研究を新たに大きく展開する道を開けたと考えている。一方、VLBI観測では最大軌道運動しか押さえるこ

とができないため、バイナリ運動の周期とその軌道からBBH質量の最大値 $5 \times 10^{10} M_{\odot}$ しか導出できなかった。強度変動の振幅にはBBHの質量の情報も含まれているので、さらなる高精度な強度モニター観測により、BBHの質量を正確に抑えることができる。

BBHの発見をさらに確かなものとするため、研究代表者らは楕円銀河3C66Bの精密モニター観測を実施することを提案した。もし銀河中心にBBHが存在するならば、BHの軌道運動に伴う電波強度の周期変動が観測されると予想される。これは、ジェットを出しているBHの軌道運動の速度とジェットの速度の合成により、ジェットの視線角はBBHの軌道運動と同じ周期で変動し、これによりドップラー・ブースティング・ファクターが変化し、放射強度が見かけ上変動したように観測されると考えられるからである。



そして、短縮された強度変動周期(P_{obs})は下記の関係式で表現される（De Paolis et al. 2004, A&A 426, 379）。

$$P_{obs} = (1+z) \left(1 - \frac{v_z}{c} \cos i\right) P_K$$

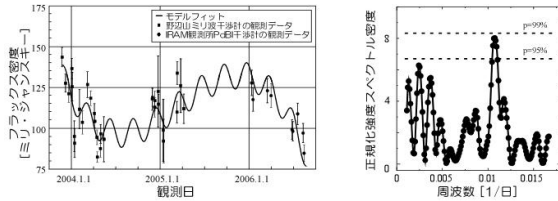
観測感度の向上：検出感度をリミットしているのはアナログ/デジタル変換器の性能が非常に大きく関与している。現在、野辺山45 m電波望遠鏡やアタカマ・サブミリ波望遠鏡（ASTE）に搭載されているアナログ/デジタル変換器のビット数は1ビットである。それを3ビットに拡張できれば、感度は1.5倍上昇する。さらに線形応答の範囲が15 dB以上確保できることからリニアリティーの改善も可能なる。さらに4 GHz（8 G samples per second）を実現すれば世界に類の無い広帯域高感度観測が実現できる。

観測精度の向上：BBHの検出可能天体数を増やすためには1%の精度で天体の強度を押さえることは重要である。リニアリティー1%の精密モニター観測精度を実現するためにはP1%を8dB以上は確保する必要がある。

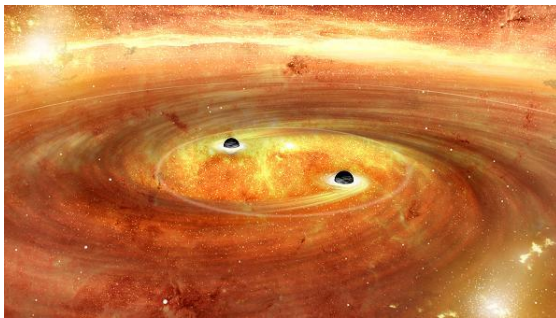
4. 研究成果

本研究では中心にバイナリーブラックホールが存在すると思われる近傍の巨大

楕円銀河・電波銀河 3C 66B の強度変動を調べるために、ミリ波帯の電波望遠鏡を用いて、詳細なモニター観測を実施した。そして、我々は、3C 66B の中心領域からの放射が約 93 日の周期で非常に弱い強度変動することを世界で初めて観測することに成功した。



これらの観測結果から2つのブラックホールの質量とその間隔の距離を導き、特に質量が重い方のブラックホールはなんと太陽質量の約 10 億倍あり、2つのブラックホールの間隔は 0.02 光年（太陽と地球間の距離の約 1200 倍）であることがわかった。そして、ブラックホールの衝突合体の過程で重力波が放射されることが予見されていることから、この2つのブラックホールは後 500 年程度で衝突することが明らかになった。



宇宙が誕生してから今まさに我々が見ている銀河へ進化していく“銀河形成史”において、銀河と銀河の衝突が幾度も繰り返し行われ、そしてその最終段階に巨大楕円銀河が誕生すると考えられている。この巨大楕円銀河の中心から合体直前の2つの巨大なブラックホールが発見されたことは、これまでの銀河形成史の仮説を強く支持する結果を得たことになる。本研究は、まさに宇宙空間において最も壮大な自然現象の内の1つを観測で捉えることに成功したという結果である。

本年度は高精度モニター観測システムの構築に成功し、システム総合試験にて予定通りの性能が出ていることを確認した。

巨大楕円銀河である 3C 66B を観測し、その中心に衝突直前のバイナリーブラックホールが存在することを発見した。この成果は、米国の天体物理学専門誌「アストロフィジカル・ジャーナル・レター」に掲載され、報道発表も行い、アメリカ天文学会等でも講演を行った。

但し、巨大楕円銀河・電波銀河 3C 66B 以外でのバイナリーブラックホールの研究はこれからであり、今後の研究に期待することとなった。

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 3 件)

- ① T. Okuda, S. Iguchi, K. Kohno, “A search for a molecular torus in NGC 4261,” 査読有, *Astrophysical Journal*, 2012, submitted.
- ② H. Sudou, S. Iguchi, “Proper Motion of the Sub-Parsec Scale Jet in the Radio Galaxy 3C 66B,” 査読有, *Astronomical Journal*, vol. 142, pp. 49-63, 2011.
DOI:10.1088/0004-6256/142/2/49
- ③ S. Iguchi, T. Okuda and H. Sudou, “A Very Close Binary Black Hole in a Giant Elliptical Galaxy 3C 66B and its Black Hole Merger,” 査読有, *Astrophysical Journal*, vol. 724, pp. L166-L170, 2010.
DOI:10.1088/2041-8205/724/2/L166

[学会発表] (計 3 件)

- ① S. Iguchi, “A Very Close Binary Black Hole in a Giant Elliptical Galaxy 3C 66B and its Black Hole Merger”, 219th meeting of the American Astronomical Society, Austin, TX, USA, January 8-12, 2012.
- ② S. Iguchi, “Very Close Binary Black Hole in a Giant Elliptical Galaxy 3C 66B and its Black Hole Merger”, Gravitational Wave Astrophysics, Binary Supermassive Black Holes, and Galaxy Mergers, Lijiang, Yunnan, China, August 1-5, 2011.
- ③ 井口聖、奥田武志、須藤広志、「衝突する直前のバイナリブラックホールの検出」、2011 年日本天文学会春季年会、筑波大学

[その他]

ホームページ等：

http://alma.mtk.nao.ac.jp/~iguchi/press_release/index.html

各種メディアでの掲載：

- とくダネ! 「衝突寸前のブラックホール発見」 2010 年 12 月 1 日 (水) 08:00~フジテレビ

- NHK ニュースおはよう日本「巨大ブラックホール 500年ほどで衝突か」 2010年12月1日(水)04:30~と05:30~NHK総合 他NHKラジオ等
- 「衝突寸前の2つの巨大ブラックホール」 2012/1/1 パリティ 2012/01 特集:物理学、この1年
- 「衝突寸前の巨大ブラックホール」 2011/09/15 ニュートン・ムック「Basic Science Illustrated ブラックホール」
- 「衝突する直前の二つの巨大ブラックホール」 2011/06/15 ニュートン別冊「ブラックホールとタイムトラベル」
- 「衝突直前のブラックホール」 2010/12/25 日経サイエンス 2011年2月号「NEWS SCAN 国内フラッシュ」
- 「衝突間近の2つのブラックホール」 2010/12/10 科学新聞
- 「二つのブラックホール 500年後に衝突」 2010/12/7 毎日新聞朝刊
- 「超巨大ブラックホールが誕生寸前? わずか500年後」 2010/12/2 AstroArts (Web)
- 「二つのブラックホール 衝突直前の観測に成功」 2010/12/1 しんぶん赤旗
- 「ブラックホール、あと500年で衝突か」 2010/12/1 朝日新聞夕刊
- 「衝突直前! 2つのブラックホール」 2010/12/1 産経新聞朝刊
- 「ぶつかる! ブラックホール」 2010/12/1 読売新聞朝刊
- 「2つのブラックホール接近 500年後衝突」 2010/12/1 日本経済新聞朝刊
- 「2つのブラックホール接近観測 500年後に衝突へ」 2010/12/1 日本経済新聞 Web 刊 (Web)
- 「急接近! 衝突直前のブラックホール、初観測」 2010/12/1 YOMIURI ONLINE (Web)
- 「衝突直前! ? 2つのブラックホール発見」 2010/12/1 MSN 産経ニュース (Web 版)
- 「ブラックホール、あと500年で衝突 「超接近」発見」 2010/12/1 asahi.com (Web)
- 「衝突直前ブラックホール初観測」 2010/12/1 NHK ニュース (Web 版)
- 「衝突直前のブラックホールを発見 500年後、ペアが合体か」 2010/12/1 共同通信 (Web 版掲載 22社: 共同 47 ニュース、北日本新聞、山形新聞、福島民報、新潟日報社、下野新聞、千葉日報、茨城新聞、東京新聞、神奈川新聞、山梨日日新聞、静岡新聞、中日新聞、福井新聞、神戸新聞、中国新聞、愛媛新聞、高知新聞、四国新聞、西日本新聞、長崎新聞、大分合同新聞)
- 他

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井口 聖 (IGUCHI SATORU)
国立天文台・電波研究部・准教授
研究者番号: 10342627

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

奥田 武志 (OKUDA TAKESHI)
名古屋大学大学院・理学研究科・助教
研究者番号: 10455199

杉本 正宏 (SUGIMOTO MASAHIRO)
国立天文台・電波研究部・助教
研究者番号: 50399276

浅山 信一郎 (ASAYAMA SHINICHIRO)
国立天文台・電波研究部・助教
研究者番号: 60390621