

# 巨大ブラックホールは何処に？ — 噴出ガス源流の隠れ家突き止める —



秦 和 弘

〈イタリア国立宇宙物理学研究機構・電波天文学研究所 Via P. Gobetti 101, 40129 Bologna, Italy〉

e-mail: hada@ira.inaf.it

ブラックホール周辺構造の直接撮像は現代天文学における究極的テーマの一つである。これを実現するうえで、観測によってブラックホールの居場所を正確に特定しておくことは極めて重要な課題である。ところがブラックホールからの噴出ガスに遮られ、これまでその正確な位置を特定するには至っていなかった。本研究では最近傍の活動銀河M87を対象に、多周波相対VLBIという新たな手法を駆使することで、隠された巨大ブラックホールの居場所をかつてないほど精密に突き止めることに成功した。ブラックホール撮影に向けたカウントダウンがいよいよ始まった、本結果はそのような気運を大きく高めてくれるものである。

## 1. はじめに

6月上旬、穏やかな晴れた午後の昼下がり。これから憂鬱な梅雨を迎えようとしている日本とは対照的に、地中海性気候はますます気持ちのよいシーズンを迎えつつある。ここボローニャは気候も人々もみなカラッとしていて研究環境としてはとても気持ちがいい(図1)。かつてこの地にはガリレオやカッシーニといった偉大な天文学者た



図1 ボローニャ市街.

ちが数多く在籍していたそうだが、彼らの大発見の理由もなんだかわかるような気もする。そんなことに思いを巡らしながら今原稿を必死で書いている。

本稿では昨年筆者を中心とするグループによって行った「巨大ブラックホールの位置特定」という内容について紹介させていただく<sup>1)</sup>。これはいまだかつて実現していないブラックホールの写真撮影を達成するうえでとても大切な研究なのである。

## 2. 噴出ガスに隠れたブラックホール？

これまでの研究から、多くの銀河の中心部には太陽の数百万倍～数十億倍という、巨大な質量を抱えたブラックホールが存在することがわかってきた<sup>2),3)</sup>。ブラックホールとは強い重力によってあらゆる物質を吸い込む、光さえも脱出できない天体だ。そのごく近傍では強い重力によって引き寄せられた物質が高速で回転するガス円盤(降着円盤)を形成し、ブラックホールは円盤を通して降着するガスの重力エネルギーを燃料として活性

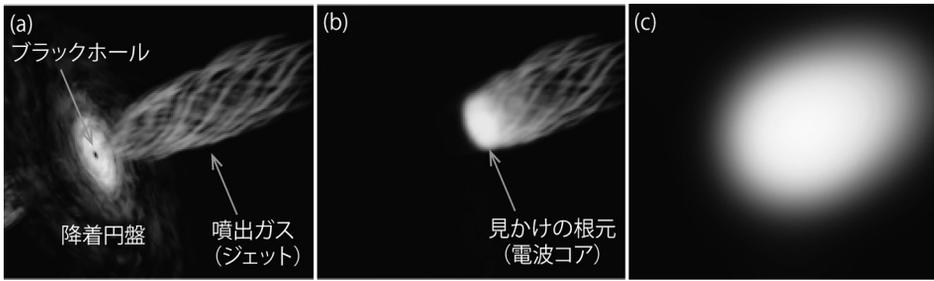


図2 巨大ブラックホールは何処に？ (a) 巨大ブラックホール周辺の想像図. (b) 電波で見た場合の (a) の様子. 電波ではジェットが圧倒的に明るい. しかしジェットの源流まで見通せるわけではなく, 吸収が晴れる流れの途中 (電波コア) からしか観測することができない. ブラックホールまであとどのくらい距離が残っているのか見極めるのはなかなか難しい. (c) 有限の解像度で見た (b) の様子. 実際の電波観測ではこのような画像が取得される (本物の VLBI 画像は図4参照). この画像を見ただけで, ブラックホールの位置を特定することなどできるだろうか? (画像クレジット: 国立天文台/AND You Inc.)

化している (図2). ブラックホール自体は輝かないが, その周辺で起こるさまざまな高エネルギー現象が電波, 赤外線, 可視光, エックス線, ガンマ線となって観測されるため, これらの情報をもとに天文学者たちは広くその存在を信じている.

このブラックホール周辺構造を実際に, 直接写真に収めて確かめることは天文学における長年の大テーマだ. 撮像によってブラックホールの「影」をとらえることができればブラックホールの存在を実証する決定的証拠となる. また周辺構造の輝度分布を詳しく調べることで強重力場中における一般相対性理論の直接検証や, 質量降着現象の物理プロセス解明にも発展する. 天文学はもとより科学全体へ与えるインパクトが極めて大きいのである (この分野の最先端の理論研究は高橋 芳太氏による天文月報2006年1月号の記事がたいへん参考になる<sup>4)</sup>).

この大目標を実現するうえで事前に解決しておくべき課題として, 今回のブラックホール位置問題がある. ただ一言に位置といってもあまりピン

とこないかもしれない. ブラックホールは銀河の中心に存在するわけであり, その意味ではわれわれはすでに座標を共有している. そこで以下ではこの問題がどういうことなのか, もう少し詳しくお話していきたい.

ブラックホールおよびその周辺で起こる活動現象は極めてコンパクトな空間スケールに閉じ込められている<sup>\*1</sup>. そういった領域を直接画像に収めて確かめるには超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometer; 通称 VLBI) による高解像度電波観測が最も有効だ (図3). VLBI は地球各地に存在する複数の電波望遠鏡をつなぐことで地球規模の実効口径をもつ巨大な望遠鏡を形成する技術であり, 将来のブラックホール撮影実現に最も近い観測技術と言われている. 既存の VLBI 観測網ではすでにミリ秒角 (1度角の360万分の1, 視力10万!) という, すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡の100倍以上の解像度を達成している.

多くの場合, この VLBI で観測されるブラック

<sup>\*1</sup> ブラックホールの半径は「事象の地平線」と呼ばれる光が脱出できなくなる領域の大きさに基づいて定義される. 地球から最も近い巨大ブラックホール候補天体は天の川銀河の中心に存在する射手座A\*であるが, それでも予想されるブラックホール半径の見かけの大きさは約10マイクロ秒角 (1度角の3億6,000万分の1) である. 夜空の満月の視直径が約0.5度角なので, そのスケールがいかに小さいかわかりいただけると思う. 本稿では以後ブラックホール半径を「 $R_s$ 」を表記する.

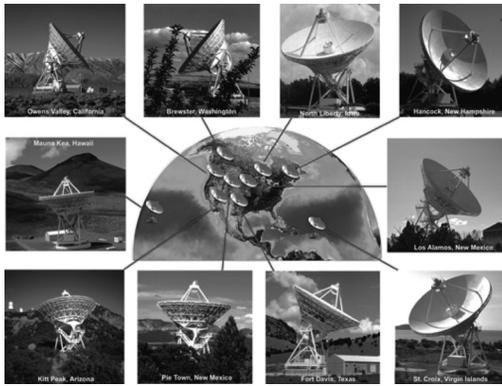


図3 Very Long Baseline Array (VLBA). 西はハワイから、東はカリブ海バージン諸島まで、全米各地に散らばる10台の電波望遠鏡で一斉に天体を観測するVLBI観測網(画像クレジット: NRAO).

ホール周辺の活動現象は「ジェット」である。ジェットはブラックホールから「噴出する」高エネルギープラズマガスの流れで、シンクロトロン放射<sup>\*2</sup>によって電波で輝いている。見方を変えればジェットの源流にはブラックホールが鎮座しているということであり、ジェットはいわば巨大ブラックホール存在の確固たる目印なわけである。

ところが問題はここからだ。高い解像度を誇るVLBIでジェットを撮影しても、ブラックホールの正確な居場所はわからないのである。実はブラックホールの近くにさかのぼるほどジェットの密度が濃くなり、その根元付近から発せられる電波はジェット自身の濃いガスによって吸収されてしまう。その結果、VLBI観測ではブラックホールが潜むジェットの源流まで見通すことができず、吸収が晴れる流れの途中からしか画像に写らないのである(図2)。電波写真を撮ると、あたかもここからジェットが発生しているように見えることから、私たちはこの吸収が晴れる地点を慣

習的に「見かけの根元」あるいは「電波コア」と呼んでいる(太陽という光球面に相当する部分である)。この電波コアとブラックホールの位置関係は画像上からは全くわからない。吸収の壁を克服しない限り、たとえいくら解像度を良くしたところで解決できない問題なのである。

この電波コアとブラックホールの位置関係を巡る議論は近年盛り上がりを見せており、ポストン大学を中心とするグループによって興味深い報告がなされている<sup>5)</sup>。彼らはブレーザー<sup>\*3</sup>と呼ばれる種族の活動銀河ジェットを対象に、VLBI画像と電波～ガンマ線に至る光度変動の相関を総合的に調べた。その結果、ブラックホールは電波コアからはるか上流(実に10,000～1,000,000  $R_g$ !)に位置している、という結論に至ったのである。この解釈は光度変動を位置情報に焼き直す際に自明ではない仮定が入るため正当性についてはまだ論争中であるものの、もしこれが本当ならブラックホール周辺撮影にとってはたいへん困ったことになる。このような天体ではブラックホールがジェットの奥深くに埋もれすぎていて、その周辺まではどうやっても撮影できないという何とも悲しい結末を意味するからである。

### 3. 巨大ブラックホール天体M87

われわれは今回地球から約5,440万光年離れたところにある巨大電波銀河おとめ座A(M87)に狙いを定めた(図4)。M87はおとめ座銀河団の中心部に位置する最近傍の活動銀河ジェットとしてたいへん有名であり、その中心には太陽質量の約60億倍という宇宙最大級の巨大ブラックホールを抱えていることが知られている<sup>6)</sup>。この「近くて重たい」という観測的利点のおかげで、M87は見かけのブラックホール半径が射手座A\*に次

<sup>\*2</sup> ジェットには磁力線が付随している。シンクロトロン放射とは、この磁力線の中を高速で運動する電子によって出される高エネルギー放射である。

<sup>\*3</sup> 巨大ブラックホールから噴出するジェットをほぼ真正面から観測している活動銀河の一種。逆にM87のようにジェットを少し横から眺めている種族は電波銀河と呼ばれる。

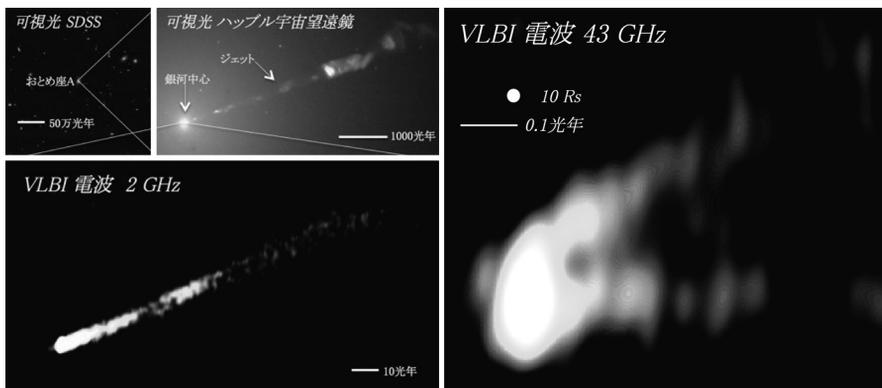


図4 観測天体おとめ座A (M87) 中心部へのズーム画像. (左端上) おとめ座A方向の可視光画像. (上段中) ハッブル宇宙望遠鏡による中心部の可視光画像. (左下) 筆者らが観測したVLBI 2 GHzによる中心核領域の高解像度電波画像. (右) 筆者らが観測したVLBI 43 GHzによるジェット根元の最高分解能画像 (画像クレジット: (左端上) Sloan Digital Sky Survey, (上段中) NASA and the Hubble Heritage Team, (左下, 右) 国立天文台).

いで2番目に大きな天体であり、将来のブラックホール撮像の最有力候補の一つとなっている。それゆえM87のブラックホール位置を明らかにすることはとりわけ重要なのである<sup>\*4</sup>。

当然M87はこれまでにたくさんのVLBI観測が行われてきた<sup>7), 8)</sup>。ブラックホール位置については主に電波コア周辺のジェット形状に基づいて議論されており、大きく分けて近傍(コアのすぐ近くに潜んでいる)とする説と遠方(コアからさらに数百 $R_s$ 上流にさかのぼった位置)とする説の二つの可能性が示唆されていた<sup>9), 10)</sup>。しかし撮像だけではこの憶測までが限界であり、この意味でブラックホールの位置精度にはまだ数百 $R_s$ の不定性があったといえる。ひっそりと身を潜めるモンスターの隠れ家を暴くには、吸収の壁を突破し、かつ光度変動などの間接的情報に頼らない、新しい取り組みが必要だったのである。

#### 4. 多周波相対VLBI

そこでわれわれはこの困難を突破するために新

しいアプローチに挑戦した。それが「多周波相対VLBIによるコアシフト測定」という手法である(図5)。

一般に、ジェットの電波コアがシンクロトロン放射の光球面に対応する場合、高い周波数で観測される電波コアほどその位置が上流(つまりブラックホール側)に少しずれることが知られている。これはジェットからのシンクロトロン放射が高周波ほど透過率が良くなるという性質があるからである。この現象はしばしば「コアシフト」と呼ばれ、30年以上も前に理論的に示されていた効果である<sup>11)</sup>。ここで少し想像してみてください。もしさらにさらに観測周波数を上げていくとどうなるであろうか? より奥へ奥へと見通すことができるようになり、やがてはブラックホールの潜む源流地点へとたどり着くであろう。すると当然それより上流にはさかのぼれないので、さらに高い周波数で観測してもコアシフトはもはや起こらなくなるはずだ。隠されたブラックホールの居場所を探し当てるためにわれわれが行ったことは、

\*4 なぜ射手座A\*を狙わないのか、と思われるかもしれない。実はこの天体、ジェットが非常に弱々しいため、今回用いた多周波相対VLBIによる作戦が適用しづらいのである。またジェットのガスとは別の、銀河中心方向に存在する濃い星間ガスが邪魔をし、射手座A\*からの電波をぼやかしてしまうのである。

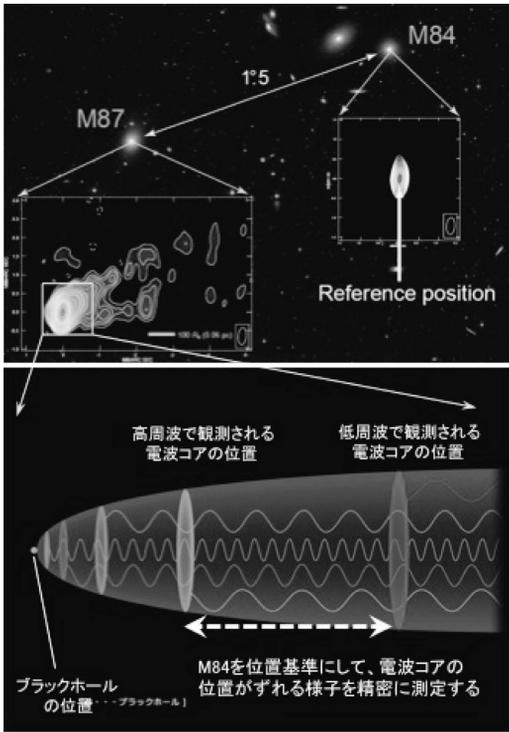


図5 多周波相対VLBI法の概要. 今回はM87から離角1.5°離れたところに位置するコンパクトな電波源M84を位置基準にしてM87電波コアの位置を調べた. このような観測をできるだけ多くの周波数で同時に行うことで電波コアの位置がずれていく様子を精密に測定し, 吸収の壁を克服する. このずれ具合の周波数依存性を精密に測定することで, それ以上さかのぼれないジェットの源流, すなわちブラックホールの隠れ家を暴くのである. (画像クレジット: (上段可視光画像) Sloan Digital Sky Survey, (下段) 国立天文台/ANDYou Inc.)

まさにこのコアシフトの収束地点を見つけ出すことなのである. そのためにはできるだけたくさんの周波数で同時に観測を行い, コアシフトの周波数依存性を精密に追跡してやる必要がある.

このコアシフトという現象, とてもマイナーである. 観測的にも確認されてはいたのだが<sup>12)</sup>,

これまで詳細な調査はあまり行われてこなかった. というのも, 予想されるずれ量が小さすぎて(1ミリ秒角以下), 検出そのものが極めて難しいのである. ましてや周波数依存性や収束地点を探る試みが精密に行われた例などほとんど存在しない.

そこでわれわれはコアシフト計測に「相対VLBI手法」を組み込むことを考えた. 相対VLBIは日本のVERA望遠鏡に代表されるように, 目標天体と離角の近い参照天体を同時観測して地球大気による揺らぎの影響を除去し, 数十マイクロ秒角レベルの精度で天体位置を決めるテクニックである. 特にM87の場合, これはブラックホール半径に匹敵する空間スケールで位置計測ができることに相当するのだ. この相対VLBIをたくさんの周波数で一齐に行うことができれば, コアシフトの周波数依存性が精密に求まり, ついには収束地点が見つかるのではないかと. 筆者らはそのように考えたのである.

### 5. 観測までが長かった

実はこのようなアイデアが大筋固まったのは, 筆者がまだ修士過程2年になったばかりの頃であった. 筆者らは早速, アメリカのVLBI専用観測網Very Long Baseline Array (通称VLBA)に観測提案を書いた<sup>\*5</sup>. しかしここからが長かった. 提案を出せども採択されないのである. あまり前例を見ない, しかも非常に難易度の高い観測内容のために, その実現可能性に疑問を示されていた. またM87は誰もが一度は観測してみたいと思うほどの重要天体のため, その競争率もトップクラスなのである.

正直この間はずらかった. アイデアには自信があるのに観測すらさせてもらえないし, 周りの優秀な同期たちは素晴らしい成果をどんどん世に送

\*5 なぜVERAでやらなかったのか思われるかもしれない. VLBAは使用可能な周波数が世界一多いVLBI観測網のため, 今回のような観測には都合が良いのである.

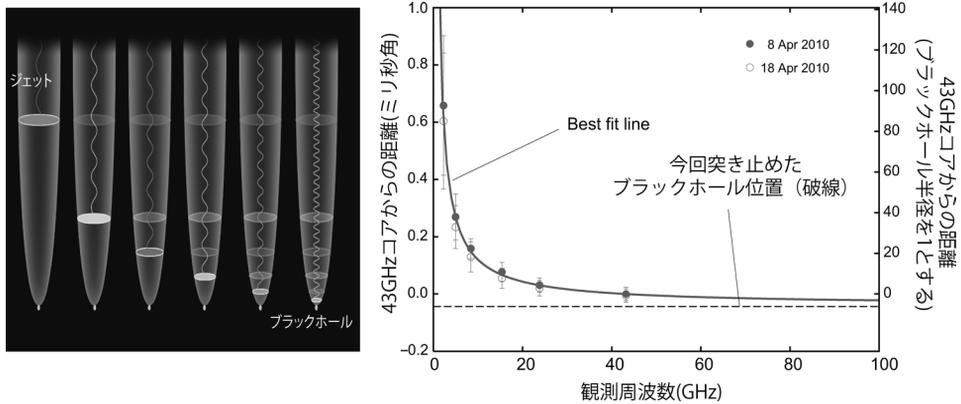


図6 多周波相対VLBIによるM87のコアシフト測定結果. 左図が実際の結果を示したもので、横軸が周波数、縦軸が測定されたコアの位置(43 GHzコアからの相対距離として示してある). 曲線はコアシフトの周波数依存性について最小2乗法でフィットした結果を表している. 破線はフィットした曲線の漸近線を示しており、この場所が今回明らかになったジェットの真の源流、すなわちブラックホールの位置に対応する. 左図は右図を模式化したもの. (国立天文台/AND You Inc.)

り出し始めている. 限られた期間の中で研究成果をまとめなければならぬ大学院生にとって自分の観測ができないというのは精神的に本当につらいのである.

気がつけば着想からもう2年、筆者はすでに博士課程2年目に突入し、もう3回連続で提案が落とされていた。限界まで練り詰めた観測戦略、これでダメならもうダメだ、そう思って臨んだ4回目の提案でついに2晩だけ観測させてもらえる許可が下りたのである。特技は我慢、という性格が身を結んだ瞬間だった。

## 6. ついに突き止めた！ 巨大ブラックホールの隠れ家

しかしまだ道半ばである。観測が成功しなければ意味がない。2010年4月、われわれの観測がVLBAによって行われた。今回用いたのは2, 5, 8, 15, 22, 43 GHzの6周波。これは現在定常的に位置天文が可能な周波数をほぼすべて網羅するものである。筆者はリアルタイムで配信されるVLBA 10台の電波望遠鏡の様子を祈るように見つめていた。今回は非常に高い位置精度が要求されるため、どこかの局で雨が降ろうものなら一貫の終わ

りだからだ。幸い全局で晴天に恵まれたのは奇跡としか言いようがなかった。

それではここから、実際の観測結果をご紹介していこう。図6は本観測で測定されたM87のコアシフトを周波数の関数として表したものである(縦軸がコアシフト量、横軸が周波数)。ご覧いただいてわかるとおり、われわれはすべての周波数でコアの位置がずれる様子を高精度で検出することに成功した。そして最も注目すべきことに、周波数が上がるにつれてシフト量ににだいにブレーキがかかり、実際に根元側でコアシフトが収束していく様子をとらえたのだ。そこでわれわれは検出されたコアシフトの周波数依存性を詳しく調べてみた。その結果ついに、収束地点が43 GHz電波コアから約40マイクロ秒角上流側に存在することを突き止めたのである。まさにこの場所こそ、われわれが追い求めていた噴出ガスの源流地点であり、ついに隠されたブラックホールの居場所を暴いてみせたのである。

当時の様子は今でも鮮明に覚えている。実は大まかな結果が見えたのは観測データが手元に届いてからわずか3日目のことである。一般にVLBIデータの解析はすごく骨の折れる作業で、一つの

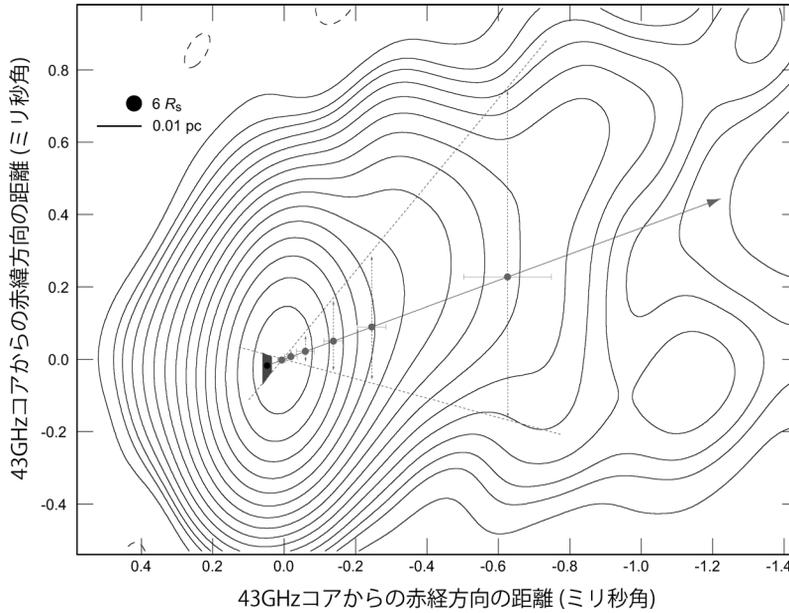


図7 M87のVLBI 43 GHz画像に測定されたコアシフトを重ねたもの。ジェット方向に沿う六つの丸点が各周波数で測定された電波コアの位置である（下流側から2, 5, 8, 15, 22, 43 GHz）。43 GHzコアのすぐ左にある影のエリアが今回の観測によって制限された巨大ブラックホールの居場所。ブラックホール直径のわずか2個分の精度で突き止めることに成功した。

画像を作成するまでに数日～数週間かかることも珍しくない。ただ筆者は当時早く結果が知りたくて、たぶん50時間くらい不眠不休で解析をし続けていた。今回の場合、6周波×2天体（参照天体と目標天体）×2日分だから、24個の画像をこの間で作ったことになる。低周波側から解析していったので、少しずつコアシフトが小さくなっていく様子を、徐々に鳥肌、脇の下に汗、だったのである。

図7は測定されたコアシフトと明らかになった収束地点を43 GHz画像上に重ねたものである。43 GHzコアから非常に近いところに収束地点が位置していることがおわかりいただけるかと思う（天球面上でわずか $6 R_s$ しか離れていない）。そこで最後にわれわれは43 GHzコアとブラックホール間の実距離を調べてみた。これはジェットの進行方向と視線方向とのなす角を与えてやることで見積もることができ、M87ジェットの場合は過去の速度計測などから約15-25度が最もらしい

範囲と言われている<sup>13)</sup>。この値を用いると、43 GHzコアとブラックホール間の実距離は14-23  $R_s$ の範囲に収まることがわかった。過去にレーザー天体で示唆されていた非常に大きな電波コア-ブラックホール間距離とは対照的に、M87の場合は驚くほどコアの近くにブラックホールが身を潜めていたのである。

## 7. ブラックホール撮影はもう目前！

M87とレーザーで電波コア-ブラックホール間距離の違いをもたらす原因については正直なところ、まだはっきりとした理由はわからない（次節で若干補足）。ただ、とにかくにもM87は「近い」という事実を決定的にしたことは今後ブラックホール周辺の撮影を実現するうえでとてもエンカレッジな意味をもつ。（少なくともM87の場合）あともう少しだけ高い周波数でVLBI観測しさえすれば、吸収の壁をほぼ完全に克服してブラックホールまでダイレクトに見通す

ことができるということを確認できたからだ。

現在、ミリ波サブミリ波と呼ばれるさらに高い周波数を用いた VLBI 実験が世界中の天文学者の協力のもと進められている。この分野は近年急速な進展を遂げている分野であり、マサチューセッツ工科大学ヘイスタック研究所が中心となって進めている国際プロジェクト「Event Horizon Telescope; 通称 EHT」はその代表例である<sup>14)</sup>。本計画は世界中のミリ波サブミリ波望遠鏡（主に 230 GHz, 350 GHz 帯）を結んで約 10 マイクロ秒角台（視力 500 万！！）という空前の解像度をめざす試みであり、日本からも大学院生を含めた有志が集いチリの ASTE（アタカマサブミリ波実験）望遠鏡などを用いて参加している\*<sup>6)</sup>。これは M87 のブラックホール直径にほぼ等しい解像度であり、吸収の壁も克服できる良いことづくめの望遠鏡なのだ。

ただ、ミリ波サブミリ波帯の VLBI は地球大気による擾乱が強烈に影響するため到来電波の干渉作業が容易ではなく、技術的にチャレンジングな段階である。残念ながら今のところ「画像を取得する」までには至っておらず、放射体のサイズや明るさなど限定的な情報を得るのにとどまっている。少し話はそれるが、実は筆者も 2010 年に行われた EHT 実験に現場参加していた。これは日本が初めて本格的に EHT 実験に参加した年であり、われわれは ASTE サイトで VLBI 用観測局の建設 (!) から始めたのである (図 8)。約 2 カ月にわたる超過密スケジュールの中、標高 4,800 メートルの砂漠で酸欠と戦いながら観測棟の土台作りのための穴掘りから始まり、信号ケーブルの配線、受信機搭載、観測棟内やバックエンドの整備、記録用ハードディスクの高地耐性試験などを経て、最後観測までこぎつけたのだ。ブラックホールが撮影できるかもしれないという充実感に



図 8 チリアタカマ ASTE サイトでの VLBI 実験の様子 (2010 年 1 月、一番右が筆者)。実は位置を特定しただけではブラックホールはまだ見えないのである。「ブラックホールを見るために本当に必要なこと、それは標高 5,000 メートルの砂漠で穴を掘ることである」これは筆者が身をもって学んだ結論である。

包まれ多少の重労働は苦にならなかったが、それでも技術面だけでなく肉体的にもたいへんな分野であるということをも身をもって実感した。

しかしこのような状況ももうじき様変わりするであろう。今や ALMA\*<sup>7)</sup> というモンスター望遠鏡の初期運用がスタートし、サブミリ波帯は超高感度観測という新たな時代を迎えている。おそらく今後数年のうちにサブミリ波 VLBI 観測網に ALMA が一局として加わることは間違いないと予想され、そうすれば実際に画像が取得できるチャンスが格段に高くなる。

人類がいまだかつて誰も目にしていないブラックホールは一体どんな姿をしているのだろう。究極の解像度、感度、そして透過率を兼ね備えた人類史上最高の「瞳」にその姿が写る日はもう目の前に迫っている。その瞬間が一日でも早く訪れるよう、筆者らは今後ともこのプロジェクトに貢献していきたい。

\*<sup>6)</sup> つい最近では、特に日本グループを中心とする EHT 実験の成果も出始めている (<http://www.miz.nao.ac.jp/submilli/content/pr2012/c01>)

\*<sup>7)</sup> アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (通称アルマ)。

## 8. ジェット研究という観点

本稿では、本研究成果の意義としてブラックホール周辺構造の撮影に大きく前進したことを強調してきた。これはまぎれもない事実であり、本成果の最も重要な帰結である。ただ一方で、本成果はジェットそのものの研究にとっても大きなインパクトがある（実は筆者の当面の研究課題はどちらかというところの色のほうが強い）。そこで最後に簡単ではあるが、こちらの観点からも本研究の意義を述べて終わりにしたいと思う。

一つ目はジェットの内部構造に関するものだ。ブレーザーとM87の間で電波コア-ブラックホール間距離になぜこれほどまで著しい違いが生じるのか？ これは本結果によってもたらされた新たな課題である。活動銀河の統一モデルによると、M87のような電波銀河とブレーザーは観測者がジェットを見込む角度が異なるだけで、本質的には同じ性質をもった天体と考えられる<sup>15)</sup>。一つの解釈として、ジェットそのものが性質の異なる二つの層からなっていて、見込む角度によって異なる層が観測されている、という可能性が挙げられる。近年観測的、理論的両面からこのジェット2層構造というアイデアを支持する結果が増えてきており<sup>16)</sup>、今回の観測もそれを裏づけるものなのかもしれない。そこで筆者らのチームは多周波相対VLBIによるコアシフト精密計測をより多くのジェット天体に適用し、系統的な調査に発展させていくことを計画中である。本稿ではコアシフトをブラックホール位置特定のためのツールとして紹介してきたが、実は恩恵はそれだけではない。コアシフトの大きさや周波数依存性はジェット内部の物理状態（特に磁場、電子密度の空間分布や電子のエネルギー分布）を反映しているため、精密なコアシフト計測からこれらの重要物理量を逆算することができるのである。多数のブレーザーと電波銀河についてこのような調査を実施し、もしも両種族間でブラックホール位置や

ジェット物理量に系統的な違いを見いだすことができたいへん興味深い。ジェット内部構造を紐解く重要な手がかりが得られるものと考えている。

そして二つ目は、ジェットの駆動メカニズムに関するものである。本成果の重要な結論の一つとして、ジェットのさまざまな性質をブラックホールからの距離の関数として探査可能になったことが挙げられる。これは観測史上初めてのことで、いまだ決定的な解決に至っていないジェットの駆動理論の解明に向けてとても大きな意味をもつ。現在筆者らは世界に先駆けて、M87のブラックホール位置周辺100-10 $R_s$ 領域におけるジェットの「形状探査」に乗り出している。ここでは詳細な結果は触れないが、ジェットがブラックホール周辺で非常に広い開口角で形成され、その後100 $R_s$ 前後で急速な絞り込みが始まることを突き止めた。非常に興味深いことに、このような振る舞いは現在最も有力視されている磁場駆動型モデルの予言と一致しているようである<sup>17), 18)</sup>。本結果は現在投稿論文としてまとめている最中であり、こちらもできるだけ早くご報告できればと思っている。

## 謝辞

本稿の内容は筆者の投稿論文および博士論文の一部に基づくものです。指導教員であった川口則幸教授をはじめ、国立天文台水沢VLBI観測所、宇宙科学研究所、ASTE観測所などたくさんのスタッフの方々にたいへんお世話になりました。この場を借りて、心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) Hada K., et al., 2011, *Nature* 477, 185
- 2) Ford H. C., et al., 1994, *ApJ* 435, L27
- 3) Miyoshi M., et al., 1995, *Nature* 373, 127
- 4) 高橋 芳太, 2006, *天文月報* 99, 26
- 5) Marscher A. P., et al., 2008, *Nature* 452, 966
- 6) Gebhardt K., Thomas J., 2009, *ApJ* 700, 1690
- 7) Junor W., Biretta J. A., Livio M., 1999, *Nature* 401, 891
- 8) Kovalev Y. Y., Lister M. L., Homan D. C., Kellermann K. I., 2007, *ApJ* 668, L27
- 9) Biretta J. A., Junor W., Livio M., 2002, *New Astron. Rev.* 46, 239
- 10) Ly C., Walker R. C., Junor W., 2007, *ApJ* 660, 200
- 11) Blandford R. D., Königl A., 1979, *ApJ* 232, 34
- 12) Bartel N., et al., 1986, *Nature* 319, 733
- 13) Acciari, V. A., et al., 2008, *ApJ* 679, 397
- 14) Doeleman S. S., et al., 2008, *Nature* 455, 78
- 15) Urry C. M., Padovani P., 1995, *PASP* 107, 803
- 16) Ghisellini G., et al., 2005, *A&A* 432, 401
- 17) McKinney J. C., 2006, *MNRAS* 368, 1561
- 18) Tomimatsu A., Takahashi M., 2003, *ApJ* 592, 321

### Nailing Down the Location of a Super-massive Black Hole as the Origin of the Radio Jet

**Kazuhiro HADA**

*National Institute for Astrophysics, Institute of Radio Astronomy, Via P. Gobetti 101, 40129 Bologna, Italy*

Abstract: Direct imaging of black-hole vicinities is one of the most important goals in astrophysics. To this end, specifying the location of black holes is crucial. Using multi-frequency astrometry VLBI technique, for the first time, we have pinpointed the location of the supermassive black hole in the center of M87 with an unprecedented accuracy. This finding brings about a great step forward to realize direct imaging of black holes.