

# サブミリ波 VLBI による銀河中心 SgrA\*の ブラックホール撮像



三 好 真

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: makoto.miyoshi@nao.ac.jp

ブラックホールは観測できる。サブミリ波帯の VLBI (超長基線電波干渉計) によって、銀河中心 SgrA\* を観測するのが最も確実な方法である。「事象の地平線」を意味するブラックホール・シャドウの検出はその存在の完全証明を与えるとともに、観測的ブラックホール時空研究という新たな分野を拓くことになる。ここでは、どんな観測装置を実現すればよいかを軸に述べる。

## 1. ブラックホールは観測できる！

大学院で VLBI (超長基線電波干渉計) による高空間分解能・観測天文学を始めたころ、福江氏のブラックホール撮像シミュレーションが天文月報などを賑わせていた (福江氏の稿参照)<sup>1), 2)</sup>。「理論家には観測限界が無くていいなあ、観測実現は百年以上先だろう」と、当時は思った。VLBI はもともと、位置天文をやろうという動機で始めたのだが<sup>3), 4)</sup>、あるときから分野の未来を考えねばならなくなった<sup>5)</sup>。そしてブラックホール撮像は実現できることに気がついた。

2000 年にローマで開催された MG9 (=相対論関連の国際研究会)、大先輩である江里口氏と夜の議論の部で、そうは言っても<sup>6)</sup>、ブラックホールの証拠は「事象の地平線」の確認だ、という話になった。奇しくも同年、ファルケらがブラックホール像のシミュレーションを報告、サブミリ波の VLBI ならば—ブラックホール周辺に漂うプラズマの電波散乱から解放され—「事象の地平線」を見渡せるだろうと結論していた<sup>7)</sup>。「事象の地平線」は Schwarzschild 半径の約 5.2 倍の差し渡しの暗がり (シャドウ) となって、輝く降着円盤の中央に見える。シャドウの形状はブラックホール

のメトリック、つまり質量・角運動量・電荷によって決まるので、その詳細な観測は強重力場における一般相対論の検証につながる<sup>8)</sup>。われわれの銀河系中心にある大質量ブラックホール、SgrA\* (=「サジエスター」と業界人は呼称する) のシャドウは、およそ  $50\mu$  秒角になる。観測的に“確かなブラックホール”と言われる天体はいくつか存在し、それらの天体の質量と距離からシャドウの見かけの大きさを見積もることができるが、SgrA\* のこの  $50\mu$  秒角という値は、最も大きいものである。2 番手は銀河 M87 の大質量ブラックホール (約 30 億太陽質量、距離約 18 Mpc) で、シャドウは  $20\mu$  秒角くらいである。VLBI の未来<sup>9)</sup>はここだ！ と勇んで、具体的な観測可能性 (感度と撮像精度) の検討を行うことにした。

## 2. 既存のサブミリ望遠鏡を集めた VLBI では？

VLBI を含む干渉計の大事な性能指標に uv カバーがある。干渉計では、その構成アンテナを結ぶ各基線が、観測天体の輝度構造の空間フーリエ成分をサンプルしている。空間フーリエ成分をできるだけたくさん集め、その逆フーリエ変換をすることで像合成 (電波写真作り) が行われる。空

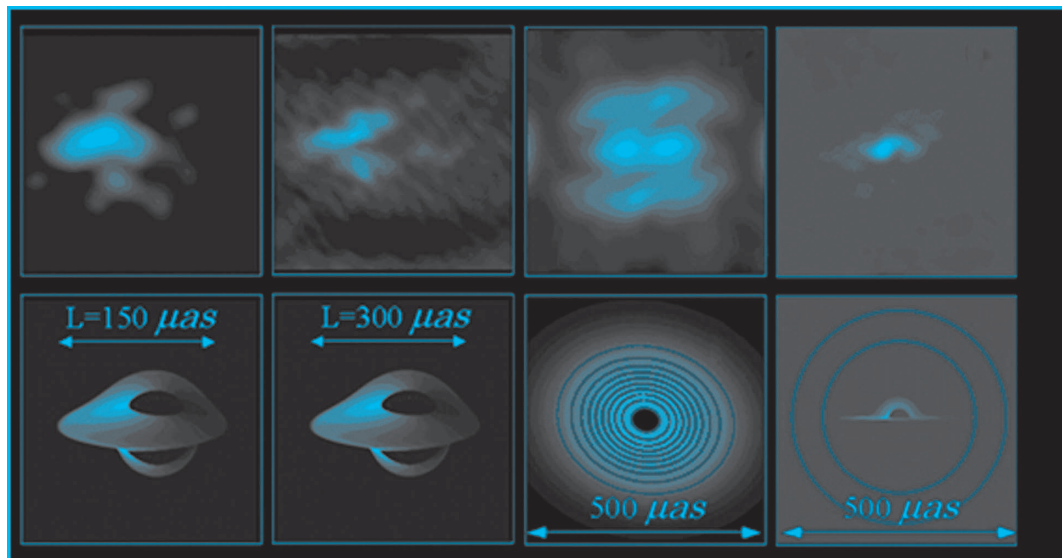


図1 既存のサブミリ望遠鏡群による場合の VLBI 観測シミュレーション。下段がモデル像、上段がそれぞれの像合成・計算結果。

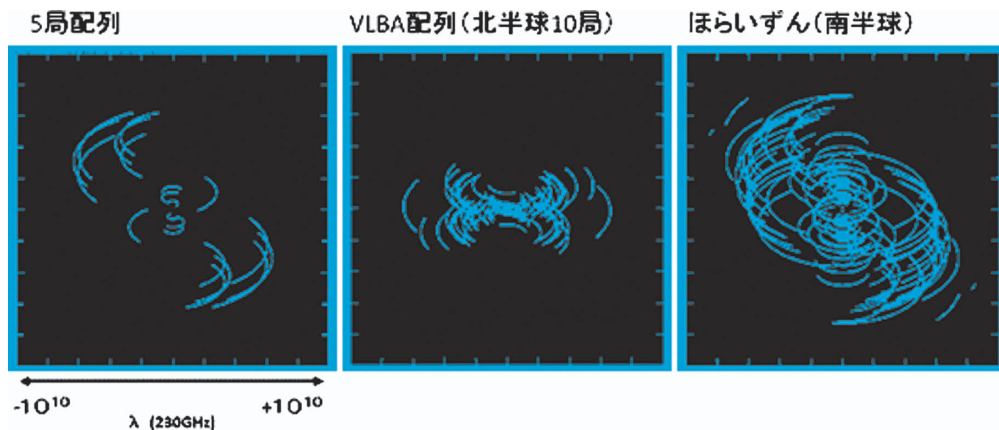


図2 SgrA\*に対する uv カバー。横軸が  $u$ 、縦軸が  $v$  方向。それぞれ天体から基線を見た時の赤経方向、赤緯方向の基線ベクトル成分を示す。左：主に現実的なサブミリ波望遠鏡 5 局による場合。中央：VLBA 配置の場合。右：ほらいずん望遠鏡の場合。

間フーリエ成分 ( $u, v$ ) が多いほど、精度の高い天体像を作ることができる。

既存・仮想の望遠鏡群を使って、SgrA\*の VLBI 観測を行った場合の撮像シミュレーションを見てみよう。図1は実在するサブミリ波望遠鏡を主体に、SgrA\*の VLBI 観測をした場合のシミュレーション結果である。ハワイ (CSO など)、米西海岸 (CARMA など)、南米チリ・ラシラ (SEST; 現在

閉鎖中)、チリ・アタカマ (ASTE, APEX など)、ペルー・ワンカヨ (仮想局: 通信アンテナを再利用、ペルーの電波天文学を始める計画がある)<sup>9), 10)</sup> の 5 局が参加した場合である。図2の左には SgrA\* に対する、その uv カバーを示す。サンプルできる空間フーリエ成分が楕円弧で表示されている。

図1の下段がいくつかのブラックホール像モデルである。左二つは降着円盤をほぼ真横から見た

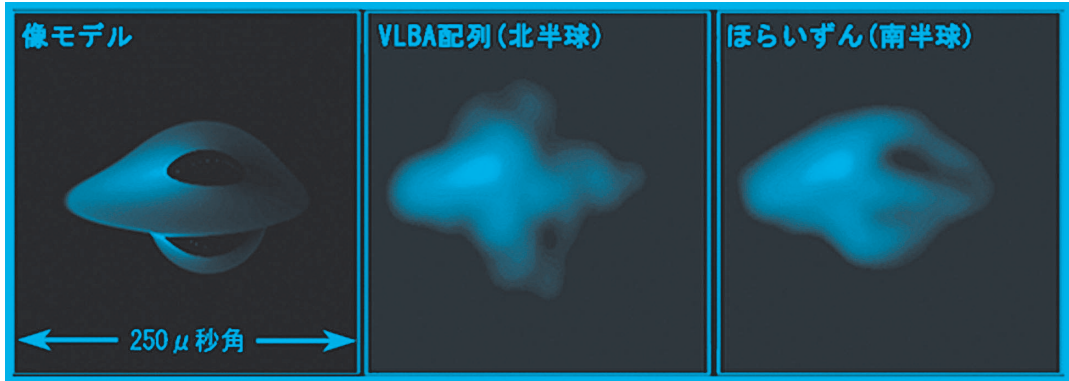


図3 左より、SgrA\* 230 GHz モデル像、北半球 VLBA の配置の場合、南半球サブミリ波 VLBI (ほらいずん望遠鏡) の場合。どちらも 10 局構成、8,000 km の広がりである。図の一边は  $250 \mu$  秒角。装置感度は現実的な受信機性能・デジタル記録装置に準拠してある。

もので、ADAF による分厚い円盤を仮定している。重力レンズ効果のため、円盤の奥側が上方に浮き上がってみえている。また下側の半球は同じく重力レンズ効果により屈折した円盤裏面の像である。ブラックホール・シャドーは二つにみえている。左から3番目は、SgrA\*のこれまでの(センチ波・ミリ波での) VLBI 観測で見てきた「楕円型」構造をもとに、その真ん中にシャドーが見えてくると考えた場合の像モデル、右端は薄い降着円盤を真横から見た場合にあたる(協力: 高橋 芳太氏)。これらを前記5局の VLBI 網で観測、感度などを計算し、像合成したものをそれぞれの上段に掲げた。AGN を VLBI で観測すると、たいていは「コア+ジェット」の構造が見えるのであるが、どの結果もそれとは一線を画す形状に見える。しかし下段に示した像モデルを再現し、ブラックホール・シャドーの存在を判別するのは相当に難しいことがわかる。

### 3. “ほらいずん望遠鏡”なら

次に、SgrA\*をよく観測できるサブミリ波 VLBI 網を設計してみることにした。SgrA\*は“いて座”、赤緯 $-30$ 度の南天にある。地上から長時間・高仰角でよく観測できるように VLBI 観測局を南半球に置こう。天体からのサブミリ波は地球

大気の水蒸気に吸収、擾乱されやすい。大気水蒸気の少ない4,000 m級のアンデス山脈を中心に配置して、全10局、差し渡し8,000 kmのサブミリ波 VLBI 網の構成を考えた。「事象の地平線(event horizon=イベント ホライズン)」をとらえる望遠鏡、そして、これは法螺(ほら)かもしれないという自重(と自嘲)を込めて“ほらいずん望遠鏡”と呼ぶことにした<sup>11)</sup>。

図3はその結果の一例である。左が像モデル、中央はuvカバーの性能の比較として、北米 VLBA の局配置の場合を示す(VLBAにはサブミリ波受信の装備はないし、あったとしても大気の状態は著しく悪い)。右端が南半球に配置した“ほらいずん望遠鏡”の場合である。VLBA配置では、ゆがんだ十字構造に映る。円盤(左右方向)とそれに垂直(上下方向)に伸びるジェットがあるかのようにも見えてしまう。一方の“ほらいずん望遠鏡”では、コンパクトで高輝度部分(図で白い部分)が空間分解能(ここでは $20 \mu$ 秒角ビーム)相応に、なまされて広がっているが、二つのブラックホール・シャドーが、輝く降着円盤の中にある姿をとらえることができる。やはり南半球に VLBI 網を構築することが重要であることが、この比較からわかる。

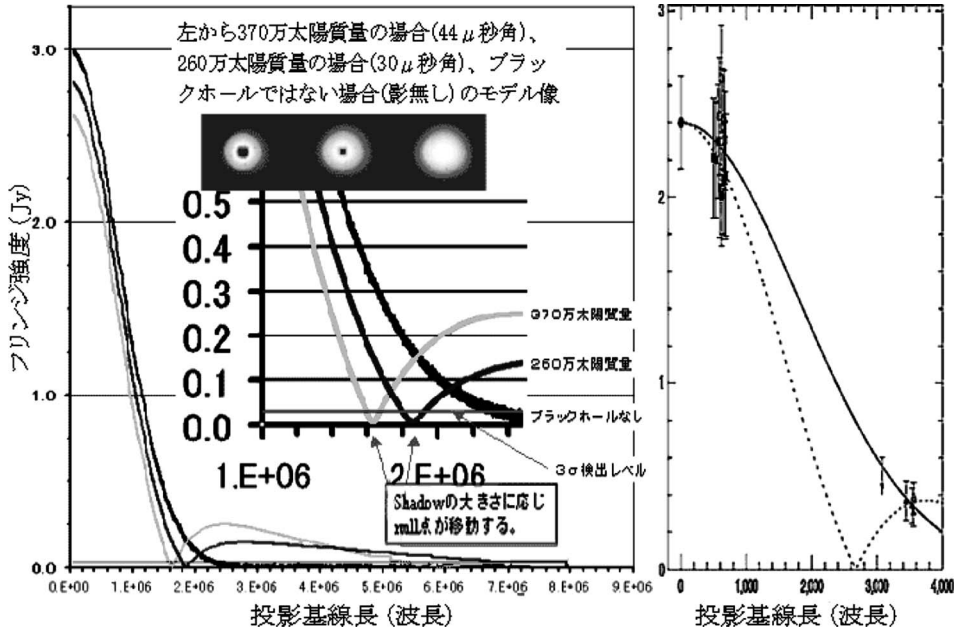


図4 左: Miyoshi et al. (04, 07)<sup>12), 13)</sup> から, 右: Doeleman et al. (08) から<sup>14)</sup>.

#### 4. お金さえあればできる？

観測装置には当然、お金がかかる。“ほらいずん望遠鏡”規模だと、ALMAの素子アンテナと同型10台、原子時計(=VLBIでは電波波形を正確に記録する必要がある)などの付帯設備も含め、おそらく200億円程度は最低必要であろう。技術的には問題もなさそうで、お金さえあれば、できそうだ。では、お金の不自由だったら何もできないのだろうか？

まず、ブラックホール・シャドールの正確な電波写真は得られないにせよ、その存在を検証する方法はないか考えた。図4は(天体への投影)基線長とフリンジ強度の図である。天体の構造と基線に応じて、フリンジ強度は変化する。天体が(数学的な意味での)一点源である場合、基線長を変えても常に一定のフリンジ強度になる。もし天体がガウス型の輝度構造であればフリンジ強度もガウス曲線になる。ガウス型の輝度分布の中央がブラックホール・シャドールで暗黒である場合、フリンジ強度がゼロになる基線長が現れるようにな

る。このようなヌル点が観測データに表れれば、ブラックホール・シャドールが存在する確率は相当高いと考えることができる。実は、このような方法はモデルフィット法と言って、uvカバーが不足していた、初期の電波干渉計やVLBI観測では盛んに使われた。天体の構造を予想し、観測データ(フリンジ強度)と合わせることで天体のサイズや形状を推定するわけである。

これまでの観測・理論からSgrA\*のブラックホールと降着円盤の性質は相当に絞られている。その知識を総動員して信頼できる像モデルを作り、VLBIデータにモデルフィットすればよい。ドールマンらによる230 GHz帯サブミリVLBI実験でもモデルフィットによる解析が行われている<sup>14), 15)</sup>。彼らの観測ではフリンジ強度ゼロとなるヌル点を押さえることができなかった。おそらく、230 GHz観測の場合、第一ヌル点は比較的短基線、1,000~2,000 kmあたりに現れる。残念ながら既存のサブミリ波望遠鏡を結んでもこの基線長は得にくい。サブミリ波望遠鏡は地球上で偏在している。今後、新規のサブミリ波望遠鏡が増えて

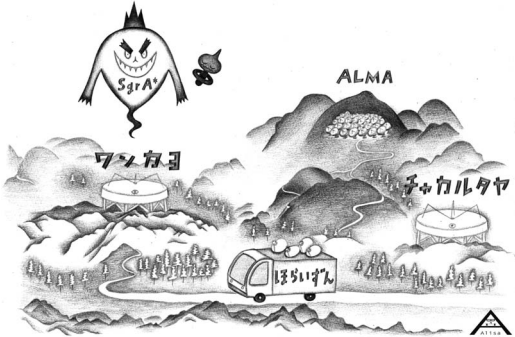


図5 最速・最安値ブラックホール結像システム (キャラバン・sub) 概念図. (画・羽馬有紗氏)

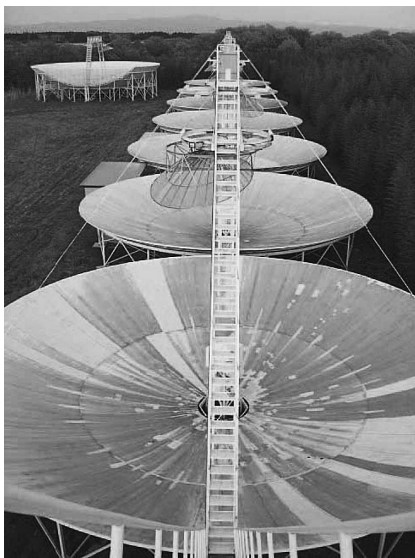


図6 早稲田大学 那須パルサー観測所 20 m 固定球面鏡 8 素子 (手前) と 30 m 固定球面鏡. 正体不明の電波トランジェント天体を検出している. <http://www.astro.phys.waseda.ac.jp> から.

いっても、それらはインフラのあるハワイ・マウナケアやチリ・アタカマに集中するだろう。VLBI 観測にそれらが参加したとしても超長基線と超短基線ばかりが重複していくだけで、uv カバーとしては増えてはいきそうにない。サブミリ波 VLBI 観測のためにはどうしても uv カバーを考慮したサイトに、新規のサブミリ波望遠鏡を意図的に作る必要がある。



図7 情報通信研究機構 (NICT)・鹿島が開発した MARBLE 小型局アンテナ.

## 5. 目標を絞り込めば安くなる

次に、観測装置をできるだけコストダウンすることを考えてみた。SgrA\*だけのサブミリ波 VLBI 観測に特化、しかもブラックホール・シャドーの存在の観測的確認だけに目標を絞り込み、サブミリ波 VLBI 網のコストダウンの検討を始めた<sup>16)</sup>。図5はそのコンセプトを示したイラスト (画：羽馬有紗氏) である。

SgrA\*特化なので南半球、アンデス周辺に限定して観測局を置く (将来、ALMA が VLBI に参画した際、短めの VLBI 基線が確保できることも念頭にある)。まず集光力を稼ぐため半固定鏡をアンデスの2カ所、例えばペルー地球物理研究所・ワンカヨ観測所<sup>17)</sup> (標高 3,300 m) 周辺とボリビア・ラパスのチャカルタヤ宇宙線観測所<sup>18)</sup> (標高 5,300 m) —ここには世界最標高のスキー場がある—に設置する。インフラがすでにあり、かつサブミリ波の観測に適し、それでいてアタカマでも、ハワイでもない場所としてはこの2点だろ

う。早稲田大学・大師堂研の那須観測所の 20 m・30 m 球面鏡アンテナ<sup>19), 20)</sup>を思い浮かべ、主鏡面は地面に固定のサブミリ波望遠鏡を想像して欲しい(図6)。球面鏡自体には焦点はないが、副鏡を工夫することで一点に集光できる。また副鏡の移動によって光学系は不変なまま観測方向を変え、何時間かの天体追尾も可能である。

これに加え移動 VLBI 局を作る。情報通信研究機構(NICT)・鹿島では 2 m 程度のアンテナを利用した移動観測局を考案、実用化されている<sup>21), 22)</sup>(図7)。それは天文用ではなく、地面の動きを測る測地 VLBI 目的の観測装置である。これを真似て、天文 VLBI 向けの移動 VLBI 局を作ればいい。さすがに口径 2 m では SgrA\*に対しては集光力が足りないので 4 枚から 6 枚くらいのアンテナを並べ、合成鏡として受信するか、もしくは、受信は個別にしておいて後で電氣的に位相合成するかである。

図5のイラストでは TV 中継アンテナ車のような移動局を考えた。これがアンデス山脈を縦断、VLBI 観測し、uv を埋めていく。当然、移動時間相当のスローシャッターによる電波写真になる。短期変動する SgrA\*の降着円盤自体はぶれてしまう。一方、ブラックホール・シャドウは不変である。したがって、ぼやけた降着円盤の中心にはしっかりと影として残るはずである。

このような目標を特化したブラックホール望遠鏡ならば、1 桁以上のコストダウンが可能であろうと思われる。20 年前、世界に先駆け、計算機(それも PC98)上でブラックホール像を得たように<sup>2)</sup>、実際の天文観測においても日本が世界初を狙いたいところだ。

## 参考文献

- 1) Fukue J., Yokoyama T., 1988, PASJ 40, 15
- 2) 福江 純, 1988, 降着円盤への招待—宇宙の大渦巻きをさぐる(講談社:ブルーバックス)
- 3) 三好 真, 1996, 天文月報 89, 11
- 4) 三好 真, 2000, 天文月報 93, 480
- 5) 今井 裕, 2008, 天文月報 101, 344
- 6) Miyoshi M., et al., 1995, Nature 371, 127
- 7) Falcke H., Melia F., Agol E., 2000, ApJ 528, L13
- 8) Takahashi R., 2005, PASJ 57, 273
- 9) 新田伸也, 2009, 天文月報 102, 35
- 10) Ishitsuka J., et al., 2007, New astronomical facility for Peru: Transforming a telecommunication's 32-metre antenna into a radio-telescope, Proceedings of Special Session No. 5 of the 26th IAU General Assembly, p. 77
- 11) Miyoshi M., Kameno S., 2002, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry General Meeting Proceeding, p. 199
- 12) Miyoshi M., et al., 2004, P.T.P.S. 155, 186
- 13) Miyoshi M., et al., 2007, PNAOJ 10, 15; astro-ph/0809.3548
- 14) Doeleman S., et al., 2008, Nature 455, 78
- 15) 三好 真, 2009, 天文月報 102, 161
- 16) 三好 真ほか, 2009, 日本天文学会秋季年会, V64a
- 17) ペルー地球物理観測所(IGP) <http://www.igp.gob.pe/>
- 18) チャカルタヤ宇宙線観測所 <http://en.wikipedia.org/wiki/Chacaltaya>
- 19) 早稲田大学・大師堂研究室 <http://www.astro.phys.waseda.ac.jp/index.html>
- 20) Daishido T., et al., 2000, Proc. SPIE 4015, 73; Radio Telescopes, Butcher H. R. (Ed.)
- 21) Ichikawa R., Ishii A., Takiguchi H., Kuboki H., Kimura M., Nakajima J., Koyama Y., Kondo T., Machida M., Kurihara S., Kokado K., Matsuzaka S., 2008, Proc. Fifth IVS General Meeting, pp. 400-404
- 22) Ichikawa R., Ishii A., Takiguchi H., Koyama H., Kondo T., Kokado K., Kurihara S., Matsuzaka S., 2009, in press

## An Approach Observing the Event Horizon around the Massive Black Hole SgrA\* with a Cost-down Submillimeter VLBI at Andes Makoto MIYOSHI

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Space-time around a black hole can be investigated using sub-millimeter VLBI. Detection of a black hole shadow gives us not only a perfect proof of the existence of black hole in the universe but also a road to test general relativity at strong gravity field from observations. Here, we describe an optimized observational instrument imaging SgrA\* black hole at our galactic center.