

天の川銀河中心の 巨大ブラックホール Sgr A* の画像化



森山



小藤



池田

森山 小太郎¹・小藤 由太郎²・池田 思朗³

〈¹ ゲーテ大学フランクフルト 60438 Max-von-Laue-Str. 1, Frankfurt am Main, Germany〉

〈² 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈³ 国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈統計数理研究所 〒190-8562 東京都立川市緑町 10-3〉

〈総合研究大学院大学 〒190-8562 東京都立川市緑町 10-3〉

e-mail: ¹ moriyama@itp.uni-frankfurt.de, ² kofuji-yutaro011@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, ³ shiro@ism.ac.jp

今年 Event Horizon Telescope (EHT) によって、我々が住む天の川銀河中心のブラックホールの姿が世界で初めて明らかとなった。本稿ではこの画像がどのように得られたのかを簡単に紹介する。

1. Sgr A* における画像化と課題

EHTは、世界中に点在するミリ波の電波望遠鏡を結ぶ地球サイズの超長基線電波干渉計である。複数の望遠鏡で同時に観測したデータは望遠鏡ペアごとに相関がとられ、天体画像の情報をフーリエ成分として得る。それぞれの空間周波数は望遠鏡ペアを結ぶ基線を天体に対して垂直な面に射影したベクトルに相当し、観測時間内の地球回転により空間周波数の情報が集められる。しかし、空間周波数の点は少なく、天体画像を一意に復元するには不十分である。「画像化」は観測データに含まれる系統誤差を考慮し、画像の事前知識を利用して適切な画像を選び出す操作である。

Sgr A* は M87* に比べ、次の2つの点から画像化が難しく、方法を改良する必要があった。ひとつは、Sgr A* と地球との間に存在する銀河面内の星間プラズマによって光が散乱され画像がぼかされる、星間散乱の効果である。我々は星間散乱の影響を長波長域の先行研究によって見積もり、観測データから相殺し、星間散乱の効果の緩和を

行った [1]。緩和の方法やその有無による画像の変化を比較し、得られた画像の信頼性を議論した。

もうひとつは Sgr A* の時間変化である。これまでの理論からの示唆と今回の EHT 観測 [2] から Sgr A* は数分程度で変化することが示されていた。一般的に電波干渉計の画像化では観測時間内に天体が静止していると仮定するが、EHT の1日の観測時間（約10時間）に比べて Sgr A* の変動は非常に速い。このため Sgr A* の画像化では時間平均された構造を検出することを目標とした。EHT では時間変動による天体構造の変化をモデル化して許容される画像の不定性として画像化法に取り入れ、時間変化の効果を緩和して時間平均された構造の検出を試みた [3]。

2. Sgr A* 画像化の結果

2017年4月の EHT 本観測データを用いた Sgr A* の画像化のため、EHT では4つの異なる画像化ソフトウェア (DIFMAP, eht-imaging, SMILI, THEMIS) を用いた [2]。このうち SMILI は日本のグループ (森山, 秋山和徳, 池田, 小藤, 本間希

樹, 笹田真人, 田崎文得, 沖野大貴, 崔玉竹) が主導して開発し, DIFMAP による画像化には浅田圭一, 小山翔子, 永井洋, 崔が参加した。

これらの画像化法には星間散乱と時間変化の緩和モデル, 画像の事前知識を表現するパラメータなどがあり, それらの設定が課題となる。EHT ではフーリエ空間上で Sgr A* の観測データと類似した特徴を持つ7つの画像 (3種類のリング状のモデルと4種類のリング状ではないモデル) の擬似観測データを用意し, 約20万通りのパラメータの組み合わせを試し, 7つの画像の構造を正しく復元する約1万通りを得た。これらによって Sgr A* の画像を復元した (平均の画像: 図1a)。

約1万枚の復元画像は異なる特徴を持つ4つのグループに分けられ, 大多数 (約97%) は方位角方向の輝度分布は異なるもののほぼ同じ直径のリング構造を持っていた (図1b, c, d)。これらの画像の直径は約50マイクロ秒角であり, 一般相対性理論の予言と一致する。こうした画像の特徴は観測データと幾何学モデルとを直接フーリエ成分の空間で比較することでも検証された。その結果, 同様のサイズのリングがデータをもっともよく説明することが示された [3]。一方, 少数 (約3%, 図1e) は明確なリング構造を持たない。この結果から Sgr A* がリングではない可能性を完全には棄却できないことになる。

少ないながらリングでない画像が得られたのは, (1) 天体の構造がリングではない, (2) 星

間散乱, (3) EHT の疎な空間周波数分布で時間変化をする天体を観測したこと, といった原因が考えられる。我々は1万枚の画像の空間周波数分布, 天体の時間変化, 星間散乱の影響を調べ, 同じような時間変動を持つリング構造および非リング構造の擬似観測データを用いて解析を行った。その結果, リングでない画像の原因が (1), (2) である可能性は (3) に対して十分低いと結論した。また, 検証のため, Sgr A* と類似した時間変化の特徴を持ち, リング構造を持つ理論シミュレーションを模擬観測して画像化したところ, リングでないものが少数得られた。以上から, 我々は少数のリングでない画像が得られる理由は天体の時間変動と空間周波数分布の粗さによって説明できることを確認した。

今回の画像化では, 多くの若手の邦人研究者が活躍した。秋山は画像化グループの代表の一人としてプロジェクトの取りまとめと論文執筆で, 森山, 小藤はそれぞれ画像化サーベイの主導に加え, 模擬観測データの作成, 画像の評価において中心的な役割を担った。今後も日本からの研究者の参加, 活躍が望まれる。

EHT は M87* に続き, 2例目となる巨大ブラックホールの視覚的な証拠を示した。今回の成果は2017年の6ヵ所8台の望遠鏡による初期観測に基づくものだが, 今後さらに多くの望遠鏡がEHT観測に参加することでリングの詳細な構造の検出が期待される。さらに観測の発展によって Sgr A* 時間変化の決定的な証拠が動画として得られれば, 一般相対性理論の検証, 銀河の形成や進化の解明に結びつくだろう。画像化に用いたデータとプログラムは, EHT公式ウェブサイトで公開している。ぜひみなさまにも画像化に挑戦してほしい。

参考文献

- [1] EHT Collaboration, 2022, ApJ, 930, L14
- [2] EHT Collaboration, 2022, ApJ, 930, L13
- [3] EHT Collaboration, 2022, ApJ, 930, L15

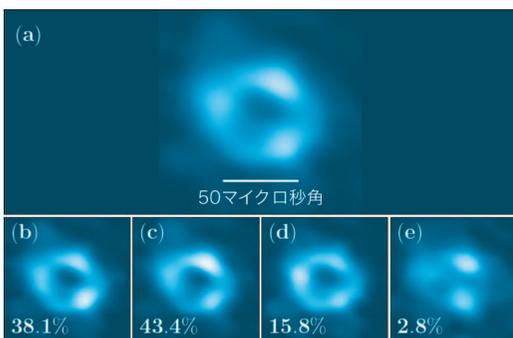


図1 Sgr A* 平均画像 (a) と4つのグループ (b-e)。