

巨大ブラックホール Sgr A* の 画像の理論的解釈

川島 朋尚¹・水野 陽介²

〈¹ 東京大学宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

〈² 上海交通大学李政道研究所 〒201210 上海市浦東新区盛榮路 520 号, 中華人民共和国〉

e-mail: ¹ kawshm@icrr.u-tokyo.ac.jp, ² mizuno@sjtu.edu.cn



川島



水野

Event Horizon Telescope (EHT) により遂に Sgr A* のブラックホールの影 (シャドウ) の観測画像が得られた。本稿では得られたリング画像に対する数値シミュレーションに基づく理論的解釈を報告する。

1. はじめに

Sgr A* の画像化により人類史上2つ目のブラックホール (BH) シャドウが得られた [1]。EHT で観測される波長 1.3 mm の放射は数分スケールの速い時間変動を示す。理論ワーキンググループでは、速い時間変動を伴う高温ガス環境下での BH シャドウから BH スピンおよび降着流の状態に迫るべく、数値シミュレーションの大規模サーベイを実施した。EHT さらには多波長 (3 mm 電波, 近赤外, X線) のデータをよく再現する理論モデルを検証した結果について報告する [2]。

2. シャドウの理論モデル構築

シミュレーションライブラリは、BH 周りの高温ガス流のダイナミクスを計算する一般相対論的磁気流体力学 (GRMHD) シミュレーションと、それを観測と比較するための一般相対論的輻射輸送計算 (GRRT) から構成されている。ジェットが明確に検出されていない Sgr A* では、M87* と比べて見込み角への不定性が大きいため、異なる見込み角での画像も用意した。

Sgr A* の理論モデル制限のため、今回は EHT の観測から5つの制限、EHT 以外の波長での観

測から4つの制限、そして時間変動から2つの制限を用いて比較を行った。その結果、すべての制限をパスできる理論モデルを得ることはできなかった。波長 1.3 mm での電波観測による時間変動が最も厳しい制限を与え、ほとんどの磁場の強い Magnetically Arrested Disk (MAD) モデルと多くの磁場の弱いモデルを棄却した。2つの理論モデルは時間変動以外の制限をすべてパスした。時間変動の課題は残すものの EHT のリング形状や多波長観測の制限をすべてパスしたこの最有力のモデルは、BH の自転が速く、磁場が強い MAD モデルで、見込み角が 30 度以下のものである。見込み角が 50 度以上のものや自転なしの BH、そして降着円盤が BH の自転に対して逆回転しているモデルは Sgr A* のモデルには合わないことがわかった。

天文学的 BH は一般相対性理論における自転する軸対称なカー BH によって表されると予測されている。Sgr A* の EHT 画像から得られたシャドウの大きさは、400 万太陽質量を持つカー BH から予測される大きさと一致することがわかった [3]。BH シャドウを縁取る光子リングの直径は BH 質量に比例し [4]、これまでの Sgr A* の観測で見積もられていた質量と整合的な結果となった。さら

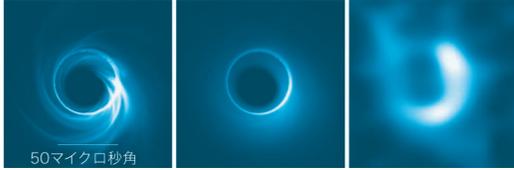


図1 Sgr A*の理論最有力モデル画像。左: スナップショット画像, 中央: EHTの観測時間に合わせて時間平均した画像, 右: EHT観測を想定した模擬観測データを用いて画像化したもの。

にそのカー計量からのずれは、10%以内であるという新たな制限を得た。また、私たちは事象の地平面の存在を確かめるため、Sgr A*が光を反射したり、熱化された放射を出すような表面を持つ高密度天体である可能性を調べた。その結果、Sgr A*が表面を持つ高密度天体である場合、観測で得られているスペクトルに合わないことがわかった。さらに、ボゾン星のような表面を持たない高密度天体の場合でも、400万太陽質量を仮定すると、シャドウの大きさは今回の観測で得られたものより小さくなる [5]。そのため、今回のEHTの観測でボゾン星の可能性も棄却できることが分かった。EHTによるM87*の観測との比較から中心質量が3桁にもわたって、一般相対性理論による予測と一致していることが示された。

3. 将来の展望

今回の観測との比較研究で得られたSgr A*の最有力のモデルは、一般的にジェットを出しやすい理論モデルである。しかしSgr A*では、今までの観測でジェットが存在する明確な証拠は得られていない。本当にジェットが存在しないのかそれともまだ見つかっていないだけなのか、X線・ガンマ線でSgr A*を中心に遠方10 kpc以上ものスケールで観測されるバブル構造（過去のSgr A*でのジェットの活動性を示唆）との整合性も

含め、この疑問は今後の研究課題である。偏光を用いた磁場構造の検証 [6] やジェットが観測されているM87*との比較を通して、ジェット形成の謎に迫ることができると期待される。

また、Sgr A*の最有力のモデルを含む多くの理論モデルはEHTの観測で得られた時間変動を説明することができなかった。磁場の強いMADモデルは磁場の弱いモデルに比べて時間変動が大きく、今回の観測による制限を超えてしまう。これは時間変動を抑える何らかの物理（粘性、磁気拡散、熱伝導、放射冷却など）が理論モデルには足りていないことを示唆している。さらに今回、時間変動の次に強い制限を与えたのは波長3 mmの放射領域サイズであった。今後、異なる非熱的電子分布の検証 [7] や電子の加速伝播を詳細に扱う計算を実施し、多波長で整合的な理論モデルを構築する必要もある。

異なる重力理論におけるBH（ディラトン場など）への降着流モデル [8] で得られたBHシャドウとEHTのSgr A*の観測結果の比較から、カーBHから大きくずれる重力理論は棄却された。しかし、カー計量からのずれが少ない重力理論は依然として生き残っている。このように重力理論についても偏光観測、より精度の高い画像や動画を用いて今後さらなる検証が必要である。

参考文献

- [1] EHT Collaboration, et al., 2022a, ApJ, 930, L12
- [2] EHT Collaboration, et al., 2022b, ApJ, 930, L16
- [3] EHT Collaboration, et al., 2022c, ApJ, 930, L17
- [4] Bardeen, J. M., 1973, in Black Holes (Les Astres Occlus), eds. DeWitt, C., & DeWitt, B. S., (Gordon and Breach Science Publishers, Paris) 215
- [5] Olivares, H., et al., 2020, MNRAS, 497, 521
- [6] Tsuneto, Y., et al., 2021, PASJ, 73, 912
- [7] Kawashima, T., et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv: 2108.05131
- [8] Mizuno, Y., et al., 2018, Nat. Astron. 2, 585