

M87* ブラックホール シャドウ画像の 理論的解釈



中村



水野



川島

中村 雅徳¹・水野 陽介²・川島 朋尚³

〈¹ 中央研究院天文及天文物理研究所 〒10617 台北市羅斯福路四段 1 號中央研究院 / 台灣大學天文數學館 11 樓〉

〈² フランクフルト大学理論物理学研究所 Max-von-Laue Str. 1, 60438, Frankfurt am Main, Germany〉

〈³ 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ¹ nakamura@asiaa.sinica.edu.tw, ² mizuno@itp.uni-frankfurt.de, ³ kawashima.tomohisa@nao.ac.jp

EHT コラボレーション理論ワーキンググループメンバーが、今回得られたM87*のブラックホールシャドウ画像の理論的解釈を簡単に解説し、将来の展望について述べる。

1. はじめに

EHT コラボレーション (EHTC) 理論ワーキンググループ (WG) の使命は、大規模シミュレーションを用いて現実的な理論モデルのライブラリを構築し、観測との比較からブラックホール (BH) 自身、またその近くで起きている物理を理解することにある。もしBHのまわりに輝くガスのような放射源があれば、BH近傍から出た光はBHの強い重力により捕らわれるため、BHは「影」のように暗く見えるはずである。これをブラックホールシャドウと言う。シャドウが理論予想通りに見えるのか？放射源は降着流なのかそれともジェットなのか？理論WGメンバーは、2017年のEHT観測の解析を固唾を呑んで見守っていた。

2018年夏、EHTC全体にM87*領域の画像が初めて示された。はっきりと見えた黒い穴は我々が先行予想してきた画像とあまりに一致していたため驚きであった。議論の末、最も確証が高いものとして得られた結果は以下の通りである。

2. シャドウの理論モデル構築

M87*は低光度活動銀河核の一つで、5,000光年以上にも及ぶジェットを噴出している天体として大変有名である。BH周りには幾何学的に厚い100億度程の高温降着流 (BHに落ち込むガス流) が存在し、EHT観測波長帯 (1.3 mm) では、シンクロトロン放射 (電子が磁場中で加速度運動する際に放つ電磁波) が卓越していると考えられている。

理論WGが構築した大規模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。計算結果は、2017年EHT観測で得られた非対称リング構造を見事に再現した¹⁾ (図1)。これはシンクロトロン放射がBHの強い重力レンズ効果を受けた結果である。そして光子リングの放射源はBHからその大きさの10倍程度かそれ以内の狭い領域に集中していることがわかった。

BHの回転、事象の地平面を貫く磁束量、ガス

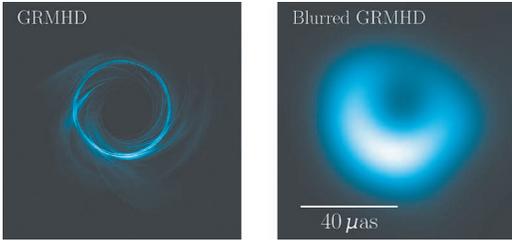


図1 左: GRMHD+GRRT シミュレーションによる M87* のBH影の理論モデル. 右: 理論モデルをEHTの解像度で均したイメージ.

流の電子温度などが異なる計60,000通りもの様々なモデルが、多角的に精査された。その結果、意外にも観測と整合的であるモデルは多岐に渡った。このことは裏を返せば、ガス流ダイナミクスにあまり依存せずBH時空での光子の振る舞いが観測画像を再現するという強い結論となった。実は回転していないBHでも観測画像を説明できるが、それは強いジェットを噴出できないという理由で否定される。また、地球から眺めた場合、BHの回転が時計回りであることもわかった。このとき、BH近傍のガスはBHと同じ方向に回転し、そのドップラー効果で観測されたようなリング輝度の非対称性が生じる。そして水野らによると、一般相対論で記述されるBH以外の天体が中心に存在する可能性は未だ棄却できていない²⁾。

3. 将来の展望

2017年春のEHT観測では感度不足のため、リング周辺に存在していると考えられるジェットの根元や降着流の検出には至らなかった。2018年にはASIAAが運用するグリーンランド望遠鏡がEHT観測に参加した。さらに2つの望遠鏡の参加が2020年以降に予定されており、これらの検出にも期待がかかる。秋山らによる本月報記事でも

紹介の通り、2007年始動のVSOP-2計画を契機に機運が高まったM87ジェットの研究は、日本人による独自の視点に基づく精力的な探求が分野の進展に大きく寄与している。例えば近年では、紀らによるジェット根元の磁場と物質エネルギー密度比の推定³⁾、秦、紀らによる東アジアVLBI観測網によるジェット速度場の測定⁴⁾、中村らによるGRMHDモデルと観測の直接比較によるジェット形状とダイナミクスの考察⁵⁾、高橋和也(京大基研)、當真らによるジェット輝度分布に基づくBH回転速度への制限⁶⁾、といったM87ジェットの本質に切り込む新しい成果が得られている。EHTによる次の大きな目標の一つは、BHの回転がジェットを駆動する過程^{7,8)}の観測的検証である。

また、EHTCはさらに870 μm帯における観測準備や衛星も含めたVLBIへの拡張も計画しており、それに連動した870 μm帯のブラックホールシャドウ予言画像からBHの回転速度に制限をつける理論研究も川島、紀、秋山によって進められている⁹⁾。平成最後にわたしたちが目にしたM87*ブラックホールシャドウの画像は、令和におけるBH天文学の新時代の幕開けを告げている。

本稿執筆には上記の著者の他、當真賢二(東北大)と紀基樹(工学院大)が携った。

参考文献

- 1) EHT Collaboration, 2019, ApJ, 875, L5
- 2) Mizuno, Y., et al., 2018, Nature Astronomy, 2, 585
- 3) Kino, M., et al., 2015, ApJ, 803, 30
- 4) Hada, K., et al., 2017, PASJ, 69, 71
- 5) Nakamura, M., et al., 2018, ApJ, 868, 146
- 6) Takahashi, K., et al., 2018, ApJ, 868, 82
- 7) Blandford, R. D., & Znajek, R. L., 1977, MNRAS, 179, 433
- 8) Toma, K., & Takahara, F., 2014, MNRAS, 442, 2855
- 9) Kawashima, T., et al., 2019, ApJ, in press (arXiv: 1905.10717)