

Event Horizon Telescope 時代のブラックホール天文学：輻射輸送・磁気流体・プラズマ微視的過程研究の現状と将来展望

Black Hole Astrophysics with Event Horizon Telescope Era

川島朋尚¹, 秋山和徳^{2,3,4}, 大須賀健⁵, 紀基樹^{6,4}, 高橋博之⁷, 當真賢二⁸, 中村雅徳^{9,10}, 森山小太郎², EHT collaboration (ETHC) members

Tomohisa Kawashima¹, Kazunori Akiyama^{2,3,4}, Ken Ohsuga⁵, Motiki Kino^{6,4}, Hiroyuki Takahashi⁷, Kenji Toma⁸, Masanori Nakamura^{9,10}, Kotaro Moriyama², ETHC members

東京大学¹, マサチューセッツ工科大学², ハーバード大学³, 国立天文台⁴, 筑波大学⁵, 工学院大学⁶, 駒澤大学⁷, 東北大学⁸, 八戸高専⁹, 中央研究院天文及天文物理研究所¹⁰

University of Tokyo¹, Massachusetts Institute of Technology², Harvard University³, National Astronomical Observatory of Japan⁴, Tsukuba University⁵, Kogakuin University⁶, Komazawa University⁷, Tohoku University⁸, Hachinihe college⁹, Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics¹⁰

1 導入

ブラックホールは光をも吸い込む天体である。この暗黒天体は、周囲の高温プラズマからの放射を介して観測することが可能である。回転しながらブラックホールへ落下するプラズマ流は降着流と呼ばれ [1]、ブラックホールの重力エネルギーを変換し、莫大なエネルギーの光や相対論的ジェットと呼ばれるほぼ光速のプラズマ流を噴出すると考えられている (Fig. 1)。

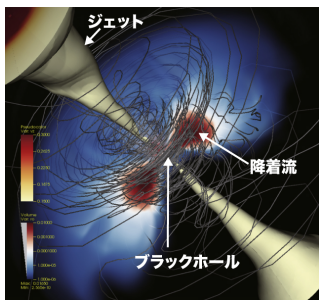


Fig. 1: ブラックホール降着流とジェットの一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション例 [5]。灰色線は磁力線を表す。

降着流は次のようにして重力エネルギーの変換を行なわれると考えられている。まず、プラズマがブラックホールの重力で引き付けられることで重力エネルギー (位置エネルギー) は運動エネルギーに変換される。このときプラズマ流は回転しており、重力ポテンシャルの深い位置へと落下したプラズマはより高速で回転し (差動回転)、磁気回転不安定性に代表される一連のダイナモ過程で磁場増幅が起きる。増幅磁場のエネルギーは磁気リコネクション等でプラズマ加熱や粒子運動エネルギーに変換される。そして高エネルギー

プラズマからの電磁波放射で降着流は明るく輝き、また磁場や輻射場を介して相対論的ジェットを駆動していると考えられている。

長い間、ブラックホールの存在は様々な波長での観測で「間接的に」示されてきた*1。しかし直接的な証明は必要不可欠であり、その方法として事象の地平面近傍のプラズマ放射が強重力で曲げられることで現れる影「ブラックホール・シャドウ」[2, 3, 4] の検出が考えられた。このシャドウ研究には、一般相対論に加え、上述のように輻射輸送や磁気流体 (MHD)、さらには運動論的なプラズマ物理が深く関わっている。

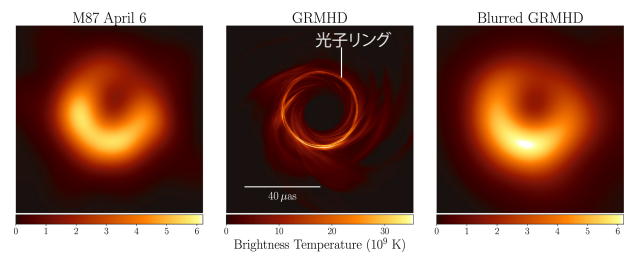


Fig. 2: 観測されたブラックホール・シャドウ (左)、数値シミュレーション結果 (中)、それを観測解像度でぼやかした結果 (右)[6]。

2 Event Horizon Telescope によるブラックホール・シャドウ初観測と理論的解釈

このブラックホール・シャドウを検出するために Event Horizon Telescope (EHT) と呼ばれる電波観測による国際共同研究プロジェクトが立ち上げられた。見込み角度が大きい近傍の楕円銀河中心 M87*と

*1 ただし、太陽の 100 倍未満の質量のブラックホールである恒星質量ブラックホールに関しては 2016 年に Advanced LIGO による重力波観測で、その存在が直接的に示された。

銀河中心 SgrA* の巨大ブラックホールが主要ターゲットである。そして 2019 年、我々は M87* において人類初のブラックホール・シャドウの検出を報告した [6]。

ブラックホール・シャドウは、予想通り直径約 $40\mu\text{as}$ の光子リング (最内球軌道付近を通り高 intensity を得た光線イメージ) に縁取られていた (Fig. 2)。一般相対論的 MHD シミュレーションおよび一般相対論的輻射輸送計算と観測結果の詳細比較から、質量はおおよそ太陽の 65 億倍と見積もられた。南北輝度の違いは降着流/ジェットの回転運動による相対論的ドップラー効果によるものであることもわかった。

3 ブラックホール・スピンの決定と相対論的ジェット噴出機構の解明へ向けて

M87* のブラックホール・シャドウの初検出により巨大ブラックホールの直接的証拠が得られ、その質量に強い制限が与えられたが、依然として多くの極めて重要な謎が残っている。例えばブラックホール・スピンの大きさや相対論的ジェット噴出機構である。

光子リング直径からブラックホール・スピンに制限を与えることは難しいが、光子リングはブラックホール・スピン垂直方向に像がシフトするという性質がある。そこでやや明るくなったときの降着流等のプラズマ直接像と位置がずれた光子リングで形成される「三日月シャドウ」によりスピンを測定する新方法を提案した [7]。検証には高い空間分解能が必要であるが、宇宙に望遠鏡を打ち上げるスペース VLBI に拡張した EHT であれば検出が可能である (Fig. 3)。

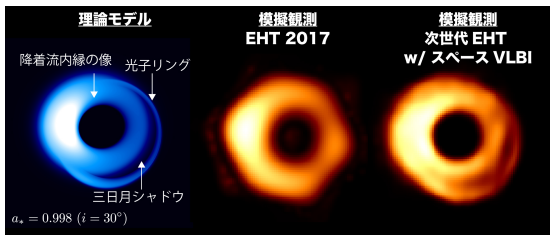


Fig. 3: やや明るいときの M87* シャドウの理論予測 (左)、EHT 2017 (中)・将来 EHT (右) アレイを仮定した模擬観測 [7]。

また、我々は多波長スペクトル計算を実施し、EHT で観測される電波強度がほぼ同じ場合でも X 線や γ 線ではスピンの影響が 2 桁以上の差で現れ、スピンに対する新たな制限を与えられる可能性を示した [9]。さらに、我々は最近、ジェットの注入プラズマ領域の像が将来の EHT で観測可能なこと、今後ジェット形成・噴出の物理に迫れる可能性を示している [8]。

4 今後の展望

EHT により事象の地平面近傍の物理を直接探る、ブラックホール天文学の新時代が到来し、ブラックホー

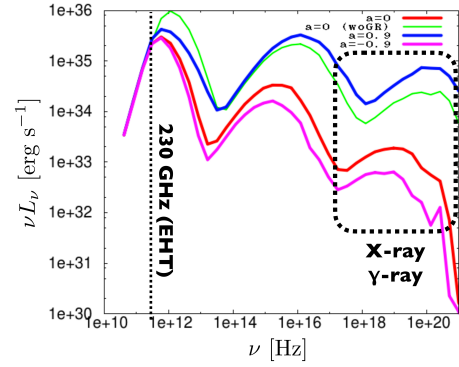


Fig. 4: 降着流の多波長スペクトル計算。スピン 0 (赤)、降着流順方向 (青)・逆方向 (マゼンタ) に高速スピン、平坦な時空 (緑) [9]。

ル・スピンの測定や相対論的ジェット噴出機構の解明等、多くの重要課題への挑戦が期待される。このような重要課題に取り組む上で、理論研究の進展が必要不可欠である。輻射輸送に関しては、偏光を取り入れた電波イメージ計算や (例えば [10])、X 線や γ 線まで拡張した偏光計算、時間変動計算が重要となる。プラズマに関しては主に理想磁気流体近似が適用されてきたが、乱流や磁気リコネクションを通した電子とイオンへのエネルギー分配効率を考慮することが重要であり、運動論的シミュレーション [11, 12] の結果をサブグリッドで取り入れた MHD シミュレーションも実施されてきている。また、自然科学研究機構の「シミュレーションによる『自然科学における階層と全体』」で実施している電子スケールのプラズマ不安定性によるジェット構造形成の PIC シミュレーション研究でも新たな知見を得られており [13]、今後この分野でプラズマ微視的過程はますます重要になると考えられる。

References

- [1] Shakura, N. I., & Sunyaev R. A. 1973, A&A, 500, 33
- [2] Bardeen, J. M. 1973, in Black Holes (Les Astres Occlus), ed. C. Dewitt, B. S. Dewitt, 241–289
- [3] Luminet, J. P. 1979, A&A, 75, 228
- [4] Falcke, H., Melia, F., Agol, E. 2000, ApJL, 528, L13
- [5] Takahashi, H. R., Ohsuga, K., Kawashima, T., and Sekuguchi, Y. 2016, ApJ, 826, 23
- [6] Event Horizon Telescope Collaboration 2019a-f, ApJL, 875, L1-L5
- [7] Kawashima, T., Kino, M., & Akiyama, K. 2019, ApJ, 878, 27
- [8] Kawashima, T., Toma, K., Kino, M., Akiyama, K., Nakamura, M., & Moriyama, K. 2020, arXiv-prints, arXiv:2009.08641
- [9] Kawashima, T., et al. in prep.
- [10] Tsunetoe, Yuh, Mineshige, S., Ohsuga, K., Kawashima, T., & Akiyama, K. 2020, PASJ, 72, 32
- [11] Rowan, M. E., Sironi, L.; & Narayan, R. 2017, ApJ, 850, 29
- [12] Kawazura, Y., Barnes, M., & Schekochihin, A. A. 2019, MNRAS, 486, 771
- [13] Kawashima, T., Ishiguro, S., Moritaka, T., Horiuchi, R., & Tomisaka, K. submitted