

# Event Horizon Telescopeによる 超大質量ブラックホールの 事象の地平面スケールの観測 II



秋 山 和 徳

〈Massachusetts Institute of Technology Haystack Observatory, 99 Millstone Rd, Westford, MA 01886, USA〉

〈Harvard University Black Hole Initiative, 20 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA〉

〈国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢区星が丘町 2-12〉

e-mail: kakiyama@mit.edu

「ブラックホール。アインシュタインの一般相対性理論が予言するこの究極の天体の写真を撮ると本当に文字どおり「黒い穴」のように見えるのか」、これが本誌上で初めて Event Horizon Telescope (EHT) について紹介した2018年の記事にて、筆者らが最初に投げかけた問いである。これに対する答えは、もはや説明不要だろう。翌年の2019年4月10日、筆者が所属する EHT Collaboration により、史上初めてブラックホールの事象の地平面スケールの姿を捉えることに成功し、その中にはブラックホールによって作り出されるシャドウとそれを縁取る光子リングが検出されたことが発表された。これまでの筆者の研究はこの画像の至るまでの道に密接に関わっており、それが評価されて今回日本天文学会研究奨励賞をいただく栄誉を賜った。本稿では2018年の記事の続報と題して、筆者らがこれまで本誌に寄稿してきた記事とは焦点を変えて、筆者自身の研究からこのブラックホール撮影に至るまでの10年を紹介し、さらに本成果によって幕開けた直接撮像によるブラックホール天文学の時代の筆者の展望を述べる。

## はじめに

2019年4月10日現地時間午前9時、米国ワシントンDCの国立記者クラブ—天文学研究者としてはなかなか袖を通すことのない正装をした筆者は、研究者としての人生における大きな転換点となる瞬間を同僚たちと共に迎えていた。この日、この瞬間、世界6か所で同時に記者会見が開催され、Event Horizon Telescope (EHT) が捉えた初のブラックホールシャドウの画像(図1)とその成果を報告する6編の論文 [1-6] が公開されたのである。発表後僅か1ヶ月の間に40億人を超える人がこの画像を目にしたことが米国下院議会の

公聴会において報告されており [7]、本成果は文字どおりの世界的ニュースとして地球上を駆け巡った。個人的には筆者自身の過去10年弱にわたる研究の目標の一つが実った瞬間であった。

EHTによって2017年4月に観測された巨大楕円銀河M87のデータから、その中心核の巨大ブラックホールM87\*が作り出すシャドウとそれを縁取る光子リングが検出された。シャドウの検出はブラックホールの存在を史上初めて視覚的に示すものであり、ブラックホールの存在の決定的な証拠となった。また同時に、一般相対性理論が強重力場における新たな試験に合格したことを意味している。さらに画像からブラックホールの質量

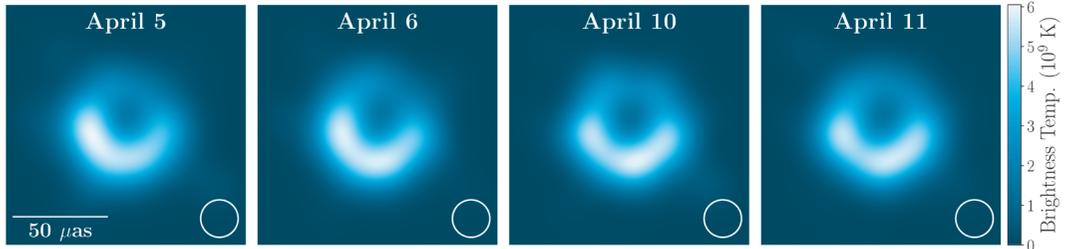


図1 2017年4月に行われたEHTの初の科学観測によって捉えられた巨大ブラックホールM87\*の事象の地平面スケールの姿[1]. 左から4月5日, 6日, 10日, 11日に取得された画像. カラーコントラストは輝度温度を示す.

が65億太陽質量であることが示され, M87のような活動銀河核の駆動源が巨大ブラックホールであることが明確に示された本成果によりブラックホールのごく近傍を撮像することでブラックホール時空及び降着流やジェットの物理を探るという天文学の新時代が開かれた.

本誌上では既にEHTに関する様々な記事が筆者自身のものも含めて寄稿されている. EHTに関する最初の記事は2018年の筆者らによるものである[8]. こちらの記事では2018年以前のEHTの歩みを, 受賞対象になったこれまでの筆者らの研究成果も含めて詳細に解説している. また2019年に出版されたEHTのM87\*の観測成果に関しては, 筆者らによる4編の速報記事が寄稿されている[9–12]. また日本語での他の解説記事として, 筆者らによる日本物理学会誌の記事[13], 本間希樹氏と筆者による岩波書店「科学」誌の記事[14], 池田思朗氏によるデータ科学に焦点を当てた日本評論社「数学セミナー」誌の記事[15]などがある. EHTの科学成果に関してはこれらの記事やEHT Japan [16]のプレスリリースも参照して欲しい.

本稿では2018年の筆者自身の記事[8]の続報と題して, これまでの本誌の記事とは少し焦点を変えて, まず筆者自身の研究を中心にしてこのブラックホール撮影に至るまでの10年を紹介する. そして後半ではEHTによるブラックホール天文学の時代の科学的展望を筆者の視点から述べる. 特に前半部に関しては本誌における過去の筆者らの解

説記事と図やトピックが重複してしまうが, その点に関してはご容赦願いたい.

## 1. 事象の地平面の構造の検出

筆者は2010年に東京大学大学院に入学し, 国立天文台の本間氏のグループから邦人唯一の学生としてこの挑戦的な国際プロジェクトに黎明期から参加することになった. 大学院生時代の最重要問題はそもそも「事象の地平面付近からの放射を果たして定常的に検出できるのか」といった根本的なものであった.

プロジェクトに参加したのは, もう一つの最重要天体である天の川銀河中心核の巨大ブラックホール, いて座A\* (Sgr A\*)で初めて事象の地平面スケールの構造が検出された[17]直後で, M87\*のあの非対称リング構造から来る信号が検出されるかまだわかっていなかった. 参加当時のEHTはまだ名もない数十名規模の小さな観測実験のプロジェクトで, 観測網も米国内の3か所の望遠鏡のみで空間分解能は現在の半分以下, 個々の望遠鏡に搭載されている観測装置も現在に比べて10倍近く感度が低かった[8]. 筆者は中心メンバーとして信号の検出やそれを較正する手法やソフトウェアの開発に携わった.

大学院生時代の5年間は試験観測から実際に事象の地平面付近からの放射が観測可能であることが示された時期となった. Sgr A\*の放射構造が数年にわたって存在することが示され, さらに電波放射の変動の起源がブラックホール近傍にあるこ

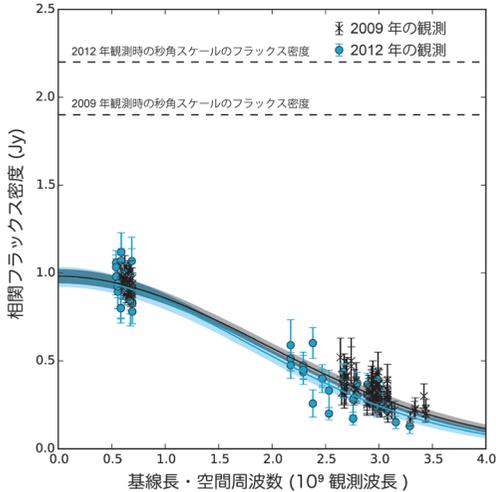


図2 EHTによるM87\*の2009年(黒点), 2012年(青点)の観測結果[23][8]より再掲. 2本の実線とそれに付随する灰色・薄青色の領域は円ガウスモデルのベストフィット及び $3\sigma$ の不定性を示す. M87\*は2009年の観測時は静穏期, 2012年の観測時には電波・超高エネルギーガンマ線増光が見られていたが, 事象の地平面スケールにおける構造の変化は有意には見られず, その大きさはシャドウ直径に一致するおよそ $5.2R_s$ であった.

とが示された[18]. M87\*については, 秦和弘氏らによる低周波帯のジェットの見測によりEHTの見測波長でブラックホール近傍が見測できることが示され[19–21], 実際に事象の地平面付近からの放射が見出された[22]. 筆者もこれまでの功績が認められて, 2012年のM87\*の見測プロジェクトを主導することになった. これが研究奨励賞の受賞対象となった一つ目の成果[23]である.

本観測によりM87\*に対しておよそ $5.2$ シュバルツシルト半径(以下,  $R_s$ )というシャドウの大きさと一致する視直径の構造が見出された(図2). これは2009年に測定された放射構造の大きさ[22]と一致しており, M87\*にはシャドウと同程度の大きさを持った構造が定常的に存在することが初めて示された. また本観測は前後で起きたブラックホール近傍におけるTeV超高エネルギーガンマ線及び電波の同時増光イベントのフォロー

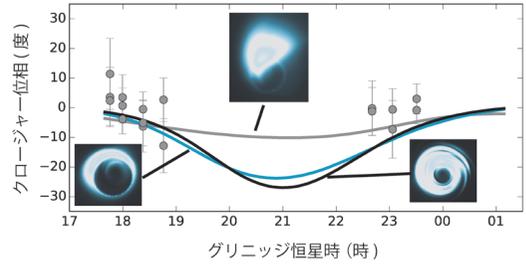


図3 EHTによるM87\*の2012年の観測で初めて検出されたクロージャー位相[23]. ここで示す3つの実線は当時出版されていたM87の降着流・ジェットの見測モデルから計算されたクロージャー位相である. 観測されたクロージャー位相はこれらのモデルと一致していたものの, 残念ながらシャドウの有無によって値が大きく変化する時間帯は信号が見出できず, シャドウが存在するかについては言及ができなかった.

アップとなっており, 事象の地平面スケールでの多波長サイエンスとしても先駆的な成果となった. 詳細は過去の筆者の記事[8]に譲るが, このイベントでは事象の地平面スケールでは構造の変化が起らず, フレア領域がジェットの下流に存在された広がった構造にあることが示唆され, 様々なフレアのモデルが棄却された.

本成果のもう一つの技術的なマイルストーンは, 画像化に必要な信号のクロージャー位相の情報を, M87\*・Sgr A\*を通して初めて見出したことにある(図3). クロージャー位相は, 天体画像のフーリエ成分の位相の情報でブラックホールの画像化には必須の見測量であり(2章参照), 実際にこれらの見測量を用いてM87\*の画像化や様々な解析が行われた(3, 4章参照).

また本成果では当時まだ数本の論文しかなかった一般相対論的磁気流体力学(GRMHD)モデルの画像と観測データが比較され, 一致することが初めて示された. 残念ながらブラックホールシャドウの有無を制限できる時間帯に信号を見出できず, シャドウの有無に関してはわからなかったものの, 今後の観測でシャドウの有無も含めて



め、多様な観測量やそれに対する観測的効果を柔軟に取り入れることが可能になった。そして画像の全輝度は非負である、画像がスパースである、あるいは滑らかであるといった事前情報を数理的に記述した正則化項を組み合わせることで、より柔軟な仮定の下、尤もらしい画像を探索する。

我々が当時着目したのが、データ科学の世界で脚光を浴びていたスパースモデリングであった。スパースモデリングは解く画像が何らかの基底でスパースになるように正則化項を導入して画像を復元する。まず本間氏と筆者らは観測データに系統誤差のない理想的なケースでスパースな画像を解くことで、CLEANよりも3-4倍高い超解像像においても高品質で画像を復元し、懸案となっていたM87\*のブラックホール質量が小さい場合でもシャドウを復元できる可能性を示した[24]。本成果はM87\*の画像化論文[4]でEHT向けに開発されたRML法に基づく最初の画像化手法の論文として引用され、電波干渉計の著名な教科書[25]にも取り上げていただいた。

さらに筆者らは別の基底での画像のスパース性を取り入れることによって、より一般的な滑らかな画像においても画像を高品質に復元する手法を開発した[26-28]。これらの成果によってスパースモデリングは偏光画像に関しても、高品質な超解像イメージングを可能にすることが示された[28]。またCLEANの懸案になっていた系統誤差に扱いに関しても解決策が見出され、系統誤差の影響を受けないクロージャー量から画像を直接復元することが可能になった[26, 27] (図4)。

スパースモデリングをはじめとしたRML法の開発は私がMITでポスドクを始めた頃を皮切りに日米のグループで精力的に進められた。アメリカのグループからは当時ハーバード大学の大学院生であったA. Chael氏(現プリンストン大)、スミソニアン天文台のM. Johnson氏らによって最大エントロピー法に基づいた手法[29]が、また当時MIT人口知能研究所の大学院生であった

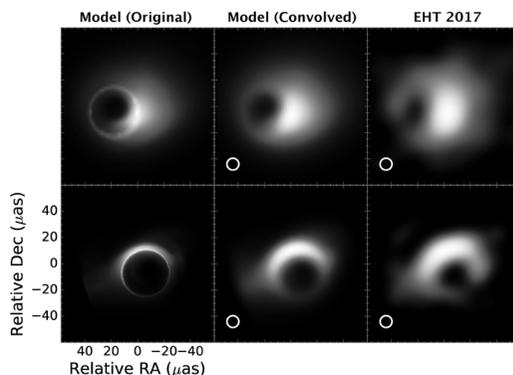


図4 二つのGRMHDモデル(上段, 下段)に基づくシミュレーションデータの画像再構成例。左列がモデル画像, そして右列がスパースモデリングによるクロージャー量を用いた復元手法[26, 27]を用いて得られた画像である([8]より再掲)。

K. Bouman氏(現カルフォルニア工科大)らによって機械学習に基づく手法[30]などの手法が開発された。手法の研究が進んだ2010年代後半は精神をすり減らすような過酷な競争の側面があった。一方でボストン近郊に筆者も含め主要な若手研究者が集まっていたため、毎日のようにオープンに議論し、共通の問題に取り組むなど数年の間に核心となる多くの手法が開発された時期でもあった。筆者が参加したクロージャー量のみからの画像復元[31]やSgr A\*に必要な3次元の動画復元の研究[32]などはグループをまたぐ共同研究の成果の一例である。これらの手法の研究が原型となり、筆者が開発を主導したSMILI[33]や米国のeht-imaging[34]などのRMLを実装した画像化ソフトウェアが同時に開発された。

またスパースモデリングはVery Large Arrayを用いた晩期星の観測[35]やアルマ望遠鏡による原始惑星系円盤の観測[31, 36]など実際の観測データに応用され、CLEAN法よりもより正確かつ高い実効解像度での画像復元が可能であることが示された。筆者らが開発してきた画像復元の手法はEHTによるブラックホール撮影だけでなく、より一般的電波干渉計観測においても有用で



画像が復元された。今月号の表紙を飾ったSMILIによる復元画像もその一つである。プレスリリースでは手法によらず復元された天体構造を示す典型的な画像として各手法の代表的な画像を平均したもの(図1)を示したが、実際の画像解析ではこの約8千枚の画像の全てが有効なM87\*の画像として画像分布の評価やリング構造の測定に直接用いられた。その結果、8千枚全ての画像において、直径40マイクロ秒角で南側が明るい非対称リング構造が確認された。

これらの結果を確認したのち、筆者らはJohnson氏、Bouman氏、Chael氏、そしてJ. Gomez氏と共に責任著者として史上初のブラックホールの画像化論文[4]を取りまとめることとなった。この論文において特に革新的だった部分だと著者らが自負しているのは後半部分のアプローチである。従来の電波干渉計観測では、一つの手法・方法で画像化を解析するのが一般的であった。一方で本論文では、画像化が劣決定問題であるという原理に立ち返り、広大なパラメータ空間を探索し、高性能な手法・方法の評価とそこから復元される画像の分布を同時に調べ、ブラックホールシャドウの検出を確認した。電波干渉計観測における画像化・画像解析の新たなアプローチが本論文によって確立したと言えるだろう。さらにまた画像化とは独立に幾何学的なモデル[5]やGRMHDモデル[6]を観測データに直接当てはめる試みも行われ、手法や構造の仮定によらず全ての観測データが同様の非対称リング構造と一致することが示されたことも明記しておきたい。

#### 4. 揺れ動くブラックホールシャドウ

2017年の観測では1週間にわたる4日間の観測全てにおいてブラックホールシャドウの存在を示すリング構造が検出された。さらに興味深いのは、4月5-6日と10-11日の間で観測データに有意な変動が見られ[3]、図1でも示されたように観測データと整合的な非対称性リング構造の向き

に僅かな変化が見られたことである[4, 6]。この非対称リング構造は2章で紹介した筆者らの過去の試験観測とも一致するのだろうか、また非対称性の向きに時間変化は見られるのだろうか。これらの疑問に答えたのがM. Wielgus氏と共に著者らが最近発表した成果である[38]。

本成果では2009-2013年に行われた初期の試験観測によって取得されたデータが再解析された。これらの観測は素子数の少ない観測網によりデータが取得されているため、特定の構造を仮定せずに天体構造を復元する画像化はできない。その代わり、本研究では2017年の観測の解析で用いられたものと同じ幾何学的モデル[6]を当てはめることで、過去の試験観測でリング構造がどのように変化したかが調べられた。

その結果、2009年から2017年の8年間にわたる観測からM87\*のリング構造の直径は不変で、65億太陽質量のブラックホールのシャドウ直径と一致した(図5)。これにより2017年の観測で検出された非対称リング構造が8年の長期にわたって存在することが本成果によって強く示唆され、その中心にあるシャドウの起源がブラックホールにあることがより確実になった。

興味深いのが非対称リング構造の直径が時間に対して変わらない一方で、非対称性の向きが年と共に変化していることが明らかになったことである。これはGRMHDシミュレーションでも予想されており、初めて事象の地平面間際でブラックホールに流れこむ降着流の構造が時間と共に変動している片鱗を捉えていると考えられている。

本成果は今後のEHTの観測によって、ブラックホール近傍のプラズマ流が揺動する姿を捉えられることを大いに期待させるものである。この変動の大きさから既にGRMHDモデルのいくつかのパラメータが棄却されており、時間ドメインでの事象の地平面スケールの観測がブラックホールの降着流を理解する上で重要であることを示した成果となった。筆者は大学院生の時に自身が解析

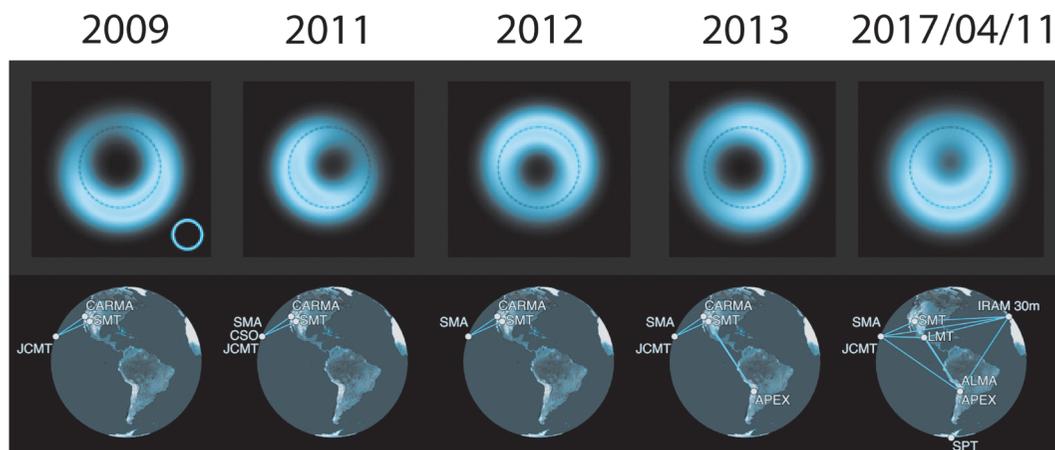


図5 2009年から2017年までの観測データと整合的なM87\*の非対称リングモデルと用いられた観測網(図は[38]とEHTCのプレスリリース[16]より)。2012年の画像は図2-3で示した筆者らの過去の観測データ[23]の再解析から得られている。非対称リング構造の直径が変わらない一方で、その向きが観測と共に変化している様子が捉えられている。

している試験観測のデータから、ブラックホール近傍の降着流のダイナミクスが明らかになることは全く期待しておらず、データを長年取得し続けることの重要性を再認識させられた。

## 5. 今後の展望

現在EHTCが取り組んでおり、近い将来成果の発表が見込まれているのは2017年のM87\*の偏光観測とSgr A\*の観測である。EHTによって観測される事象の地平面付近の偏光画像はブラックホール磁気圏における磁場構造を反映しており、全輝度の画像に比べてブラックホールスピンの、ブラックホールを貫く磁束といった降着流の基本的なパラメータにより制限がつくことが期待されている[39-41]。

一方、Sgr A\*では2020年のノーベル物理学賞の受賞対象になった近赤外線の観測によりブラックホール質量が極めて高い精度で測定されている[42, 43]。そのためブラックホール時空をより高精度で測定できることが期待されている(例えば[44])。Sgr A\*に慎重な解析が必要なのは、星間散乱効果と分単位で起きる天体構造の時間変化の

ためである[8]。前者については近年の低周波帯の電波観測から1.3 mm帯において画像に与える影響は限定的であることが明らかになっており[45, 46]、後者に関しても先ほど紹介した動画復元[32, 47]など様々な手法が開発されている。観測中に起こるブラックホール付近のプラズマ流のダイナミクスから理論モデルやブラックホール時空にどれほど制限がつくかも重要な観点になるだろう。

また今後EHTは唯一無二のブラックホール撮影装置として、大幅に拡張される予定である。パンデミックにより1年延期となってしまったが、2021年には新たな3つの望遠鏡が正式に参加し、2023年にはさらに新たな望遠鏡がもう1局加わる予定だ。これによって画像の実効感度が大幅に向上する。さらに2021年にはより高い周波数である345 GHz (0.87 mm) 帯での観測が予定されており、空間分解能も向上する。さらにEHTは2023年までに数ヶ月にわたるM87\*とSgr A\*のモニター観測の実現を目指している。今後数年以内に、より高い空間分解能とより高い感度でブラックホールシャドウ近傍の放射が高品質な動画

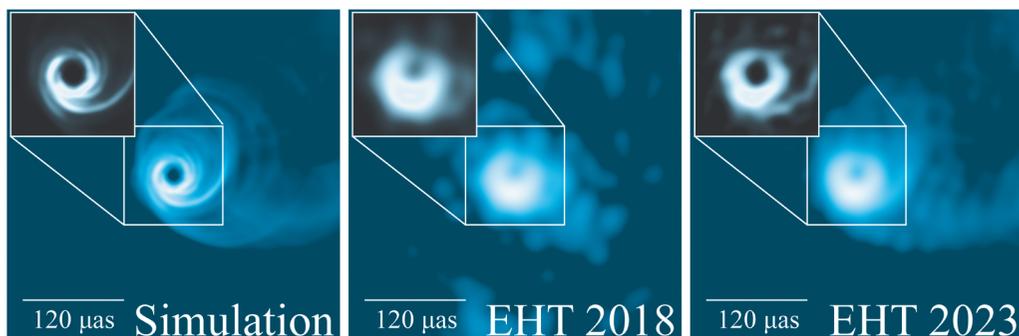


図6 筆者らによる2020年代のEHTの観測網を仮定した観測シミュレーション。左図はM87\*の一般相対論的輻射磁気流体モデル[48]，中図は2018年の観測に試験的に参加したGreen Land Telescopeを加えたEHT2018の観測網による擬似観測画像，右図はさらに3局の望遠鏡が加わり，230 GHzと345 GHzの多周波観測が可能になった2023年の観測網による擬似観測画像である。各図共にカラーコントラストは暗い放射を見せるために対数スケールを用いている。輝度が最も明るいブラックホールシャドウ近辺の放射に関しては，各図左上のパネルで線形スケールのカラーコントラストで輝度分布を示した。今後数年以内により高い観測周波数とより多くの望遠鏡が加わるにより，光子リングと降着流がより空間分解され，さらにその周囲の淡いプラズマの放射が数 $100 R_g$ のスケールにわたって検出されることが期待されている。

として捉えられるようになるのである（図6）。

さらにnext generation EHT (ngEHT) と呼ばれるEHT専用の望遠鏡を新たに複数加えた次世代観測網の設計が現在進められている[49]。ngEHTではブラックホールシャドウの近辺の放射よりも1000倍近く暗く広がった放射を正確に捉え，事象の地平面スケールから低周波帯で観測されている数 $1000 R_g$ スケールまでのジェットを詳細に捉えられることが期待されている。ngEHTは現在設計段階にあり，2020年代後半に観測網の構築に着手することを目指している。

このように2020年代においてもEHTの観測網は進化を続け，より高品質なブラックホールの画像が偏光，時間，周波数の軸を持った5次元動画として取得される。このような多次元のデータを扱うためにデータ科学を駆使した様々な手法の研究が精力的に進められているが，ここからどのような成果が期待できるか，筆者の展望を示す。

### 5.1 降着流とジェットの物理

まず第一に理解が進むと考えられているのはEHTの画像に見えている電波放射の元であるブラックホール近傍の降着流やジェットである。今

後2017年の観測では空間分解能不足ではっきりと区別できなかった光子リングとその周りの降着流の放射が空間分解され，また実効感度不足で検出できなかったジェットなどの広がった放射が捉えられるようになる（図6）。天文学において長年の課題だったブラックホール近傍で相対論的ジェットがどのように駆動されるのか，そこで磁場がどのような役割を果たすのか，こういった過程が多次元動画の中に映し出されるのである。既に片鱗が見えている降着流の動的な姿（4章）についても，渦状腕などブラックホールの周りを回転するプラズマの構造が時間的，空間的に分解され，より理解が深まるだろう。また東アジアVLBI観測網などによる低周波帯観測（例えば[50–52]）を組み合わせた多波長観測によって，ジェットが収束・加速される下流（例えば[21, 53]），あるいは降着流のより外縁部とEHTの捉える領域がどのように関係しているのかが明らかになるだろう。

もう一つの重要な問題はジェットを持つ活動銀河核において電波からガンマ線に至るまで見られる非熱的放射の起源である。電波など低エネルギー

ギー側で非熱的放射を担う相対論的電子（あるいは陽電子）は粒子加速[54, 55]や電子対生成（例えば, [56, 57]）などによって生成されていると考えられており、それがどこでどのようにして起きているかが大きな問題になっている。近年、降着流中[31, 58]、ジェット内に発生するよどみ面（＝ジェット流の動径速度がゼロとなる面）の底部[59]、より下流も含むジェットの根元領域全体[60]など、事象の地平面近辺での様々な場所における相対論的粒子生成がEHTによってどのように観測されるか研究が進められており、2020年代のEHT観測での切り分けが期待されている。また生成された相対論的粒子が下流まで維持されるのか、あるいはジェット下流での粒子加速（例えば[61]）などによる新たな粒子の注入が必要なのか、これについても低周波観測で捉えられる下流のジェットの輝度分布の理論的な研究が例えば高橋和也氏や荻原大樹氏らにより行われており[62, 63]、今後の観測的検証が期待される。

このような高品質な多次元動画が得られた時にブラックホールのスピン、磁束、電子のエネルギー分布といったブラックホール降着流やその放射を記述する基本的な物理量[5]を測定できるのか、これについても定量的な評価が進みつつある。特に最近精力的に進められているのは深層学習など最新の統計手法を用いて、ブラックホールの動画においてどういった構造がどの物理量に影響されているのかを調べる研究である[64, 65]。まだこれらの研究は黎明期にあるが、近年の研究で明らかになってきたことはプラズマ流に現れる構造はこのような基本的な物理量によって特徴付けられる情報を多分に含んでいることである。例えば、最初期の成果[64]ではたった一枚、一周波数の全輝度のスナップショットの画像からでも2023年以降の空間分解能まで到達すれば、実際に多くの物理量の測定が可能になることが示されている。より多次元の動画を用いた研究が今後進むことが予想され、物理量の測定技術やその背景

にある物理の理解が進むことが期待される。

## 5.2 ブラックホール時空の測定

EHTの科学目標の一つはM87\*及びSgr A\*の時空計量の精密測定である。一般相対性理論において回転するブラックホールを記述するKerr時空は質量とスピンのみで決まるため、これは質量とスピンという二つの量の測定に帰着する。

質量やスピンの測定に使える観測の一つはブラックホールシャドウの形状である。EHTのM87成果発表後、シャドウを縁取る光子リングの理論的研究が進み、その微細構造を利用することによってシャドウの形状をより高精度に測定できることが明らかになった[66]。この微細構造を観測データから抜き出すことによって、シャドウの形状をより高い精度で決定する手法が開発されている（例えば[67]）。今後解像度と感度が改善し、多数の観測が行われることでシャドウの形状の決定精度は大幅に向上するだろう。

ブラックホールのスピンは、EHTが観測する画像にも影響を与えることが示されている。例えば、川島朋尚氏・紀基樹氏らによってスピンによる時空の引きずり効果によってブラックホールの前景放射と光子リングの見え方が変わることで、シャドウ上に回転するブラックホールに特有のフィラメント状の構造が現れることが指摘されている[68]。またスピンの観測画像に与える効果は放射の全強度に比べてより微細な構造が出やすい偏光画像に強く現れることが、恒任優氏らの近年の研究[40, 41]などによって示されている。実際に前章で述べた深層学習を用いた初期の研究においても、2023年以後のEHTの空間分解能によってスピンの測定が高精度で可能になることが示唆されている[64]。このような放射構造全体から時空を測定する研究にも進展が見込める。

また輝度分布の時間変動に現れる一般相対性理論的效果を利用して、ブラックホールスピンを測定する手法の理論的な研究や開発も進められている。例えば、森山小太郎氏らが先駆的な研究をし

た重力レンズ効果による放射のエコー [69] は降着流モデルに強く依存せずに時空構造を測定するプローブの候補として精力的に研究が進められている [70-74]. 最近の成果では画像化を経ずに EHT の観測データから直接的にエコーを捉えられる可能性が示されており [71], こちらも理論的な研究の進展と実際の観測データへの応用が楽しみである.

### 5.3 Kerr 時空及び一般相対性理論の検証

EHT によって観測される重力場がそもそも一般相対性理論の Kerr 時空で記述されるのか, もしズレがあるとすればそれがどれほど大きいのか, これも我々が EHT を用いて探りたい重要なテーマである. このテーマに関してもこの数年間, 数多くの研究がなされているが, ここでは数例の研究を挙げて展望を議論する. EHT が測定する超巨大ブラックホール近傍の強重力場における観測が, 重力波やパルサータイミングアレイなど他の観測装置による重力理論の検証とどのような相補性を持っているかについては T. Baker 氏による論文 [75] を参考にされたい.

一般相対性理論を検証するために太陽系などの弱い重力場において, Parametrized post-Newtonian Formalism (PPN 形式) と呼ばれる他の重力理論の可能性を含めた時空計量の表現が用いられてきた. この PPN 形式において, 一般相対性理論からの一次の変位 (1PN 項) は太陽系内の弱い重力場における様々な検証によって高い精度で 0 と一致することが示されてきた [76]. 一方, 二次の変位 (2PN 項) の効果は弱い重力場では非常に小さくなるため, 高精度の測定が困難であった. EHT が観測する強重力場においてはこの二次の変位である 2PN 項が実際に測定される観測に影響を与える. D. Psaltis 氏が主導した EHTC の最新の理論的研究 [77] では, 回転しないブラックホールにおいては一般相対性理論からの変位の影響が 2PN 項に比例してシャドウの直径に現れることが示されている. 回転するより一

般的なケースにおいても 2PN 項によって 2017 年当時の EHT の測定精度で十分検証が可能なほど大きく変位することが明らかとなった. シャドウの形状も同様に変化することが示されており [78], 今後の EHT による観測によって高次での一般相対性理論への変位がより高精度で制限されることを期待したい.

またシャドウだけでなく, 時空構造が Kerr 時空からずれることによって降着流の振る舞いがどのように変わるか, そしてそれがどのように観測されるのかといった研究も精力的に進められている. 先駆的な研究として, 水野陽介氏らによる他の重力理論下でのブラックホール降着流の研究 [79] や一般相対性理論の枠組み内で理論的に予言されているボソン星における降着流の研究 [80] などがある. このようなケースでの理論的研究はまだ黎明期にあり, 最新のデータ科学の手法を用いて EHT の観測量あるいは観測画像からどれくらい制限がつくかなど, 重要な研究課題が多くある. 今後数年で飛躍的に理解が深まるだろう.

## 6. おわりに

本稿では, これまでの EHT の歩みとこれから大幅な進展が見込めるブラックホール天文学の展望を筆者らの研究を軸に紹介した. 最後に, これらの研究を展開するにあたって国内にある電波望遠鏡で積んだ経験がこれまでの研究において礎となったことに触れたい.

私が電波天文学の世界に入ったのは, 北海道大学の学部生時代である. この時代に北海道大学が保有する 11 m 電波望遠鏡を通して学んだ単一鏡観測の基礎が, EHT の観測において, 素子になる各望遠鏡の振る舞いを理解するのに大いに役に立った. そして東京大学大学院生時代には国立天文台水沢 VLBI 観測所の VERA などを使った研究 [50] を通して, 国内の VLBI 観測装置に触れ, 観測装置内の信号の流れを実地で学び, さらにそれがどのようにデータに現れるのかを学んだ. これ

らの知識なしには、技術的フロンティアである EHT のデータ解析に太刀打ちできなかった。

筆者はこれまでの10年で、EHTのような新しい技術や装置を開発することで観測的ブレークスルーを狙うプロジェクトにおいて、小中規模の観測装置を通して学ぶ経験がいかに生きるかを身を以て体験した。電波天文学、あるいは観測天文学全体が大型望遠鏡・大規模観測網によって駆動されるビッグサイエンスの時代に移行しつつあるが、日本の天文学分野においてこのような経験をえられる場が引き続き維持され、新たな画期的なプロジェクトの芽となることを期待したい。

## 謝 辞

本研究奨励賞の受賞に際して、私の大学院生時代の指導教官であり、そして良き共同研究者として EHT の黎明期から二人三脚でデータ解析・画像化手法の模索に共に取り組んできた本間希樹氏に改めて深く感謝を申し上げる。

筆者のこれまでの研究は数多くの人によって支えられてきた。私を電波天文学の世界に引き入れ、その基礎を叩き込んで下さったのは徂徠和夫氏、南谷哲弘氏である。大学院生時代には紀基樹氏、永井洋氏、秦和弘氏らと毎日のように議論し、国立天文台水沢 VLBI 観測所の皆さんには大変お世話になった。統計数理の師匠である池田思朗氏や岡田真人氏ら多くの他分野の研究者からは様々な統計手法を学んだ。そしてその手法を電波干渉計に応用してデータを画像化する SMILI は田崎文得氏、森山小太郎氏、笹田真人氏ら開発チームと日夜議論を重ねながら開発された。

学生時代に英語をろくに喋れなかった筆者を EHT の中心地へと快く招き入れ、さらにポスドクとして受け入れてくれたのは EHT 創設者の Shep Doleman 氏、現在の上司である Vincent Fish 氏である。ポスドクとして渡米してからは、Katie Bouman 氏、Andrew Chael 氏、そして後に EHT の画像化作業班を共に率いることになった

Michael Johnson 氏の三名とは良きライバルとして、時には共同研究者として画像化技術を切磋琢磨してきた。この三名、Jose Gomez 氏、筆者の5人で史上初のブラックホールの画像化論文 [4] を責任著者として主導したことは貴重な体験となった。また世界中に散らばる数多くの共同研究者、同僚、学友との議論が糧になった。

本記事の執筆に当たって、秦氏、紀氏、水野氏、川島氏、本間氏、中村雅徳氏、小山翔子氏、嶺重慎氏から貴重なコメントをいただいた。最後に新型コロナウイルスが猛威を振るう米国においてパンデミックの影響を受けた筆者に配慮して、本稿の執筆を辛抱強く待ち、推敲を手伝ってくださった天文月報編集部の皆様にこの場を借りて感謝させていただき、本稿の締めとさせていただきます。

## 参考文献

- [1] EHT Collaboration et al., 2019, ApJ, 875, 4 L
- [2] EHT Collaboration et al., 2019, ApJ, 875, 1 L
- [3] EHT Collaboration et al., 2019, ApJ, 875, 2 L
- [4] EHT Collaboration et al., 2019, ApJ, 875, 3 L
- [5] EHT Collaboration et al., 2019, ApJ, 875, 5 L
- [6] EHT Collaboration et al., 2019, ApJ, 875, 6 L
- [7] アメリカ下院科学宇宙技術委員会, 2019, 2019年5月16日公聴会, <https://www.congress.gov/event/116th-congress/house-event/LC64189/text> (2020.12.23)
- [8] 秋山和徳, 本間希樹, 2018, 天文月報, 111, 358
- [9] 松下聡樹他, 2019, 天文月報, 112, 444
- [10] 田崎文得他, 2019, 天文月報, 112, 446
- [11] 中村雅徳他, 2019, 天文月報, 112, 448
- [12] 秋山和徳他, 2019, 天文月報, 112, 450
- [13] 秋山和徳他, 2020, 日本物理学会誌, 75, 4
- [14] 本間希樹, 秋山和徳, 2020, 岩波書店「科学」, 90, 161
- [15] 池田思朗, 2019, 日本評論社「数学セミナー」, 58 (8), 41
- [16] <https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j> (2020.12.23)
- [17] Doleman, S. S., et al., 2008, Nature, 455, 78
- [18] Fish, V. L., et al., 2011, ApJ, 727, L36
- [19] Hada, K., et al., 2011, Nature, 477, 185
- [20] 秦和弘, 2012, 天文月報, 105, 695
- [21] 秦和弘, 2017, 天文月報, 110, 700
- [22] Doleman, S. S., et al., 2012, Science, 338, 355
- [23] Akiyama, K., et al., 2015, ApJ, 807, 150
- [24] Honma, M., et al., 2014, PASJ, 66, 95
- [25] Thompson, A. R., et al., 2017, Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, 3rd Edition
- [26] Akiyama, K., et al., 2017, ApJ, 838, 1

- [27] Kuramochi, K., et al., 2018, ApJ, 858, 56  
 [28] Akiyama, K., et al., 2017, AJ, 153, 159  
 [29] Chael, A. A., et al., 2016, ApJ, 829, 11  
 [30] Bouman, K. L., et al., 2016, CVPR, 913  
 [31] Chael, A. A., et al., 2018, ApJ, 857, 23  
 [32] Johnson, M. D., et al., 2017, ApJ, 850, 172  
 [33] <https://github.com/astrosmili/smili> (2020.12.23)  
 [34] <https://github.com/achael/eht-imaging> (2020.12.23)  
 [35] Matthews, L. D., et al., 2018, AJ, 156, 15  
 [36] Yamaguchi, M., et al., 2020, ApJ, 895, 84  
 [37] Bouman, 2016,  
 [38] Wielgus, M., et al., 2020, ApJ, 901, 67  
 [39] Gold, R., et al., 2017, ApJ, 837, 180  
 [40] Tsunetoe, Y., et al., 2020, PASJ, 72, 32  
 [41] Tsunetoe, Y., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2012.05243  
 [42] Boehle, A., et al., 2016, ApJ, 830, 17  
 [43] GRAVITY Collaboration, et al., 2019, A&A, 625, L10  
 [44] Psaltis, D., et al., 2015, ApJ, 814, 115  
 [45] Johnson, M. D., et al., 2018, ApJ, 865, 104  
 [46] Issaoun, S., et al., 2019, ApJ, 871, 30  
 [47] Bouman, K. L., et al., 2018, IEEE Trans. Comput. Imaging, 4, 512  
 [48] Chael, A., et al., 2019, MNRAS, 486, 2873  
 [49] Blackburn, L., et al., 2019, arXiv e-prints, arXiv:1909.01411  
 [50] Akiyama, K., et al., 2013, PASJ, 65, 91  
 [51] Asada, K., et al., 2017, arXiv e-prints, arXiv:1705.04776  
 [52] Park, J., et al., 2019, ApJ, 887, 147  
 [53] Nakamura, M., et al., 2018, ApJ, 868, 146  
 [54] Sironi, L., & Spitkovsky, A., 2011, ApJ, 726, 75  
 [55] Sironi, L., & Spitkovsky, A., 2014, ApJ, 783, L21  
 [56] Levinson, A., & Rieger, F., 2011, ApJ, 730, 123  
 [57] Broderick, A. E., & Tchekhovskoy, 2015, ApJ, 809, 97  
 [58] Chael, A. A., et al., 2017, MNRAS, 470, 2367  
 [59] Kawashima, T., et al., 2020, ApJ in Press., arXiv:2009.08641  
 [60] Davelaar, J., et al., 2019, A&A, 632, A2  
 [61] Davelaar, J., et al., 2020, ApJ, 896, L31  
 [62] Takahashi, K., et al., 2018, ApJ, 868, 82  
 [63] Ogihara, T., et al., 2019, ApJ, 877, 19  
 [64] van der Gucht, J., et al., 2020, A&A, 636, A94  
 [65] Yao-Yu, L., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2007.00794  
 [66] Johnson, M. D., et al., 2020, Sci. Adv., 6, eaaz1310  
 [67] Broderick, A. E., et al., 2020, ApJ, 898, 9  
 [68] Kawashima, T., et al., 2019, ApJ, 878, 27  
 [69] Moriyama, K., & Mineshige, S., 2015, PASJ, 67, 106  
 [70] Moriyama, K., & Mineshige, S., 2016, PASJ, 68, L6  
 [71] Moriyama, K., et al., 2019, ApJ, 887, 227  
 [72] Gralla, S. E., & Lupsasca, A., 2020, Phys. Rev. D, 101, 044031  
 [73] Hadar, S., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2010.03683  
 [74] Wong, G. N., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2009.06641  
 [75] Baker, T., et al., 2015, ApJ, 802, 63  
 [76] Will, C. M., 2018, Phys. Rev. Lett., 120, 191101  
 [77] Psaltis, D., et al., 2020, Phys. Rev. Lett., 120, 191101  
 [78] Medeiros, L., et al., 2020, ApJ, 896, 7  
 [79] Mizuno, Y., et al., 2018, Nature Astron., 2, 585  
 [80] Olivares, H., et al., 2020, MNRAS, 497, 521

## Resolving the Event Horizon of Supermassive Black Holes with the Event Horizon Telescope II

Kazunori AKIYAMA

*Massachusetts Institute of Technology Haystack Observatory, 99 Millstone Rd, Westford, MA 01886, USA*

Abstract: Does the black hole literally appear as a dark object in the Universe if we can photograph this extreme object predicted by Einstein's general relativity? This question, raised in our first article about the Event Horizon Telescope (EHT) at the *Astronomical Herald* in 2018, was finally answered — on April 10, 2019, the EHT Collaboration released the first-ever image of a black hole on horizon scales, with a bright photon ring illuminating the shadow of the super massive black hole M87\*. My research over the past decade has been tightly related to these first images of a black hole, which has been recognized by the FY2019 Young Astronomer Award of the Astronomical Society of Japan. Here, I review various horizon-scale science explored with the EHT, as an update from our 2018 article. First, I will give an overview of the EHT studies in the past decade with my research focused. Then, I discuss the future prospect for the exciting new era of horizon-scale black hole astrophysics with the EHT.