

ブラックホールを見た日 ～EHTプロジェクトの舞台裏～

国立天文台 水沢VLBI観測所 田崎 文得

1. ブラックホール・シャドウの撮影に成功！

2019年4月10日、ブラックホールの撮影に成功したというニュースが世界中を駆け巡りました（**図1**）。撮影されたのは、おとめ座にある楕円銀河M87の中心に位置する巨大ブラックホールで、その質量は太陽の65億倍にもなります。イベント・ホライズン・テレスコープ（EHT）プロジェクトによる、この成果発表から2年が経とうとしている今、プロジェクトがどのように撮影に至ったのかを振り返ると共に、この成果を皮切りに今後ブラックホールがどのように発展していくのか、展望を述べていきます。



図1. イベント・ホライズン・テレスコープ（EHT）で撮影された M87 の巨大ブラックホールの画像。
©Event Horizon Telescope

2. EHTは何を撮影したのか？

「何を撮影したって？もちろんブラックホールでしょう」と思われるかもしれませんが。そもそもブラックホールとは何でしょうか。宇宙空間にぽっかりと空いた黒い穴…？

実は、星と同じく宇宙に浮かんでいる天体です。ごく狭い領域内に大きな質量を詰め込んでいるため、周囲にとっても強い重力を及ぼしています。あまりにも重力が強いために事象の地平面という境界領域が存在し、一旦その中に入ってしまうと光さえも抜け出すことができません。光が出ないため真っ黒な天体となるわけです。私たちは目に光が入ることで物を見るので、光が出ないブラックホール自体を見ることは決してできません。一方で、ブラックホールの近くには、ブラックホールに吸い込まれるか吸い

込まれないかの瀬戸際にある光が周回する領域（光子球）があります（図2）。この光子球から外れてたまたま地球の方に飛んできた光を観測することで、図1のリング構造を撮影することができます。リングの内側の黒い領域をブラックホール・シャドウと呼びます。

EHTで撮影したのはブラックホールそのものではなく『シャドウ』で、これこそがブラックホールの強い重力によって光の軌道が大きく曲げられている証拠なのです。

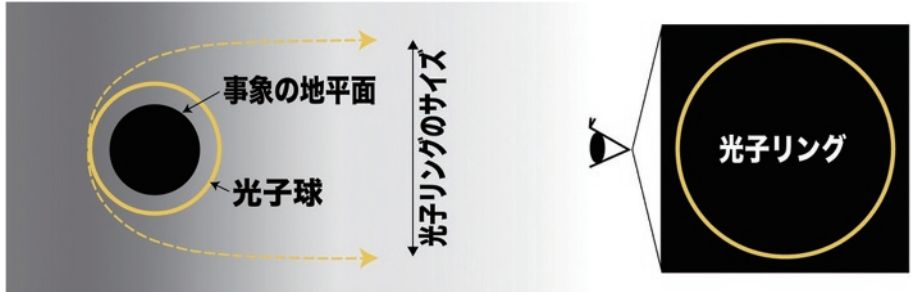


図2. ブラックホールの事象の地平面と光子球の概念図(左)。光子球から外れた光を観測することで、リング構造を撮影する(右)。

3. ブラックホールの大きさ

理論的研究から、ブラックホールを撮影するとリング構造が見つかるということはわかっていました。しかしながらブラックホールがあまりにも『小さい』ため、これまでは撮影できませんでした。

ブラックホールの大きさは質量で決まります。M87ブラックホールの質量は太陽の65億倍なので、観測されるリングの大きさは直径900億キロメートルと計算されます。これは太陽系もすっぽり入ってしまうほどの大きさです。ところが、地球からM87までは5500万光年（1光年はおおよそ9.5兆キロメートル）離れているので、大きなリングも小さく見えます。見た目のサイズは角度の単位で表しますが、M87ブラックホールのサイズはおおよそ



図3. EHTの望遠鏡配置図（2017年現在）。

40マイクロ秒角（1億分の1度）です。これは月面におかれたテニスボールを地球から撮影するくらいの小ささです。これほど『小さな』ブラックホールの撮影を実現するのが、イベント・ホライズン・テレスコープ（EHT）です。EHTは地球上に配置された電波望遠鏡を組み合わせ、仮想的に巨大な地球サイズの望遠鏡を構成します（図3）。この遠く離れた電波望遠鏡を組み合わせるシステムは、超長基線電波干渉計（VLBI）と呼ばれています。EHTの角度分解能は25マイクロ秒角、視力が1の人と比べるとその300万倍もの視力に相当します。EHTであれば40マイクロ秒角のブラックホールを撮影することができるのです。ところが一口に『撮影』と言っても、携帯のカメラで写真を撮るかのように簡単には画像を得ることはできません。EHTでどのようにブラックホールを撮影したのでしょうか。

4. プロジェクトの軌跡① ～観測から相関処理～

たくさんの実験や試験観測を経て、2017年4月、ついにブラックホール撮影を目的にしたEHTの本格観測が行われました。EHTメンバーがそれぞれの電波望遠鏡に滞在し、2週間以上にわたって観測準備や実際の望遠鏡運用を行いました。一方、アメリカのマサチューセッツ州に設置された中央司令室にもプロジェクトのディレクターを始め多くのメンバーが集まり、各望遠鏡サイトの気象条件や装置の状態を確認しながら、いつどの天体を観測するか決定し、各望遠鏡を運用するメンバーへ指示を出しました。こうして観測された電波は、それぞれの場所でハードディスクに記録され、アメリカのマサチューセッツ州とドイツのボンに空輸されました。そこでは相関処理と呼ばれるデータ処理が行われます。一つの望遠鏡の記録データはノイズ（雑音）だらけですが、相関処理することでようやく天体からの信号を見つけることができます。つまり、観測時には天体をきちんと観測できているかどうかはわからず、相関処理をして初めて観測が成功したかどうかはわかるのです。

5. プロジェクトの軌跡② ～観測データからの画像化～

相関処理したデータに誤差を補正する作業（較正作業）を施したのち、ようやく画像化に取りかかります。ただし画像からは程遠い姿をした観測データ（図4）から画像化するのは難しい問題です。さらにブラックホールの画像化の場合には、次のような2つの問題がありました。一つは、予測される構造がEHTで解像できる限界に近くらい小さいことです。この画像化を達成するためには、EHTの能力を最大限に活かすことのできる、

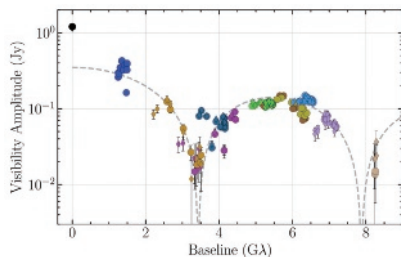


図4. EHTのM87観測データ。
©EHT Collaboration

高性能な画像化手法を導入する必要がありました。もう一つは、ブラックホールがどのように見えるか理論的には予測されていたものの、これまで実際にその画像を見た人は誰もいないということです。理論予測でもたらされた事前知識に左右されない公平中立な画像を、細心の注意を払って復元する必要がありました。これらの問題を克服するために、著者を含む画像化チームのメンバーは、新しいVLBI画像化手法の開発に取り組み、さらに2段階の画像化プロセスを取り入れました。

<画像化ツールの開発>

チームは、日本主導とアメリカ主導で新しい画像化ツールを開発してきました。著者も2014年から、日本主導ツール SMILI の開発や試験に携わってきました。2016年にはこれら2つのツールに携わる研究者が集まって、画像化チャレンジを開始しました。開発ツールが EHT の画像化を達成できるかどうかを評価するために、EHTの観測データを模した擬似データを作成し、そこから画像化を行います。

この時正解画像を知らない状態から画像を復元することで、答えがわからない問題でも、きちんと正解画像に辿り着けるかどうかを評価します。画像化チャレンジでは、自分たちのツールで足りない機能を実装しながら、擬似データからの画像化に挑戦し、結果を他のチームと共有し答え合わせ、さらに必要な機能を議論する、ということを何度も繰り返しました。

本物のEHTデータではありませんが、世界中の若手研究者と画像化方法や擬似データの扱いについて議論を繰り返した画像化チャレンジは、とても大変であったものの、楽しく興奮する経験でした。

<EHTデータの画像化>

2017年にEHTで観測したM87のデータが、2018年6月にいよいよ画像化チームに配布されました。日本の画像化メンバーは水沢VLBI観測所の会議室に集まり、初めての画像化に取り組みました（表紙写真）。

作業を始めて30分ほどで最初のリング構造が見えた時には、この瞬間に立ち会うことができた喜びと同時に、それまでの苦労が報われてホッとしたというのも、著者の正直な感想です。

その後、日米欧のメンバーで構成されたチーム（チーム2）で議論を重ね、2018年7月に画像化メンバーがアメリカに集結、他の3チームとそれぞれの結果を見せ合いました。実はこの時までには、4チームの間での情報共有は一切行わず、チーム外からの影響が全くない状態で、画像化を行いました。これが2段階画像化プロセスの一つ目です。この工程により、独立なチームでも同じ構造が復元できるかどうか確かめたのです。その結果、全チームで南側の明るい非対称なリング構造が得られた（図5）ことで、会議室は大きな興奮に包まれました。

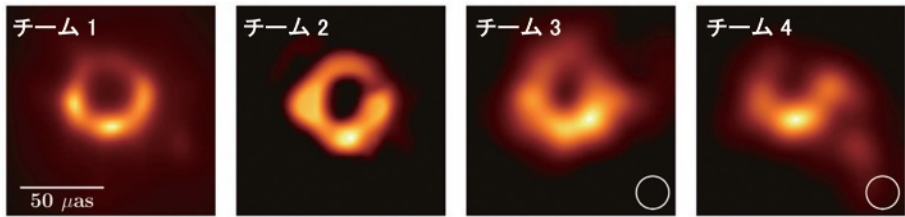


図5. 2018年7月に各チームが出した M87 ブラックホール・シャドウの画像。

©EHT Collaboration

一方、4チームの画像は少しずつ異なります。その理由は、それぞれのチームで使った画像化ツールが異なること、またそのツールで適用した設定値も違うからです。そこで、画像化チームは正解のわかっている擬似観測データを使って、画像化方法を評価することにしました。ツールや画像化の設定値を変えながら、延べ5万通りの画像化方法を用意し、擬似観測データから画像を復元しました。これが2つ目の画像化プロセスです。この工程は本当に大変な作業となりました。

著者自身も、朝昼夜問わずアメリカの同僚と連絡を取りながら、画像化設定値の調整や画像化プログラムの実行に注力しました。そして最終的には、正解画像をよく再現する画像化方法を2千通り選ぶことができました。この2千通りの画像化方法を、EHTのM87ブラックホール・シャドウを正しく復元する方法として採用し、実際の観測データに適用することで、2千枚の“正解画像”を得ることができました。

ただし、2千枚全てをみなさんにお見せすることは難しいので、あくまでも広報用として、1枚の代表画像（図1）を公開しています。この広報用画像は、3つツールそれぞれから代表となる1枚の画像を選び、それらを平均することで作られています。

6. プロジェクトの軌跡③ ～論文執筆から成果発表～

得られた画像からどのようなことがわかるか、物理に基づいたシミュレーション結果と観測結果が一致するか、などの議論を経て論文を整え、最終的には全部で6編204ページにおよぶ大作論文となりました。

内部審査ののちに論文雑誌へ投稿し、外部の審査を経て、論文を出版できるかどうかが決まります。つまり外部審査員こそが、プロジェクト外で初めてEHTの成果を目にする人となるのです。その外部審査員のレポートに『Congratulations!』と書いてあるのを見た時、「ああ本当に私たちが成し遂げたんだ」と心から嬉しく思ったのを今でも覚えています。

論文執筆前から少しずつ進めていた記者会見の準備も、論文投稿後は急ピッチで進み、2019年4月10日に世界同時記者発表となりました。著者はプロジェクトの広報活動の取りまとめ役も務めているため、世界中の研究機関との記者会見の調

整、発表内容の準備、プロジェクトメンバーやその他の論文著者たちとの調整に追われました。アメリカ、チリ、ヨーロッパ、台湾、中国、日本で同時に記者会見を行ったため、時差の関係から日本時間では夜10時開始となりましたが、東京の会見会場には多くのメディアが集まり、盛大な記者会見となりました（図6）。



図6. 日本での記者会見の様子。EHT日本メンバーが集結。著者は前列左から4番目。

©国立天文台

7. ブラックホール研究の今後

EHTプロジェクトは、M87のブラックホール・シャドウの画像を公開して終わりではありません。ブラックホール研究は、画像という新しい武器を手に入れ、新時代に突入したばかりです。

2019年4月以降EHTプロジェクトからは、3C279という巨大ブラックホールから噴出するジェットの本質が折れ曲がっていることを発見した成果や、2017年よりも前の試験観測データを使ってM87のリング構造が長期で揺らいでいる様子を報告する成果など、ブラックホールの周りで何が起きているのかを知る手がかりとなる、ワクワクする結果がたくさん出ています。また、見た目のサイズが大きいもう一つのブラックホールで、私たちの住む天の川銀河の中心にある「いて座Aスター」を撮影した成果もまもなく公開です。

ブラックホール周辺の強重力場ではどのような物理が働いているのか、どのようにガスがブラックホールに吸い込まれるのか、どうやってジェットが噴出しているのか、このようなブラックホールの謎に迫る研究成果に、今後もご期待ください！

著者紹介 田崎 文得(たざき ふみえ)



©国立天文台

国立天文台水沢VLBI観測所特別客員研究員。研究対象は巨大ブラックホール周辺の活動現象。イベント・ホライズン・テレスコープ（EHT）のメンバーとして、画像化ツールの開発や画像化解析を担うほか、広報の取りまとめも担当している。現在は企業でデータサイエンティストとしても勤務し、天文学者との二足のわらじで奮闘中。