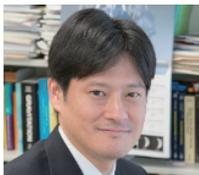




Science Plaza

ブラックホール撮影成功と今後の展望



国立天文台 教授
水沢 VLBI 観測所 所長

本間 希樹

1. 遂にその姿を現した巨大ブラックホール

2019年4月、人類が初めて撮影した「ブラックホールの写真」が公開されました(図1)。写真は電波で撮影されたもので、丸いドーナツのような構造が写っており、中心は黒く抜けています。この中心の黒い穴が、ブラックホールの「影」を捉えたものです。ブラックホールは光も物質も飲み込んで絶対に脱出できない天体ですから、黒い影として見えるのです。ブラックホールのような奇妙な天体があるかもと人類が考え始めてから、実に100年に渡る科学の進歩を経て、私たちはようやくその姿を目にすることができたのです。

今回の写真に写っているのは、おとめ座の巨大楕円銀河 M87 の中心にある、巨大ブラックホールです。銀河とは太陽のような星が何千億個もあつまってきた天体で、私たち人類が住む太陽系も天の川銀河という銀河の中にあります。宇宙には銀河が無数に散らばっていて、M87 もそのような宇宙にたくさんある

銀河のうちの1つで、地球からは5500万光年ほど離れたところにあります。

今回撮影されたドーナツの輪の直径は、光だと4日で横断できる距離(4光日=0.01光年)です。一方、銀河全体の大きさは10万光年以上も広がっています。両者を比べると、銀河全体から見て本当に点のような小さな場所に、図1のようなドーナツが隠れていた、ということになります。実はドーナツ状に光っている部分は、ブラックホール周辺にまわりついた「光の衣」です。ブラックホールの重力があまりにも強いため、光はまっすぐ進むことができず、ブラックホールの周りをぐるぐる回りだします。そのためにブラックホールの大きさよりも少し外側に光の輪が見えて、そしてその中心が暗い「影」になるわけです。光の輪の大きさはブラックホールの重さに比例するので、今回の撮影からブラックホールの質量が太陽の65億倍という想像を絶するものであることもわかりました。

Contents

Science Plaza

ブラックホール撮影成功と今後の展望 1

Topics

ヒアリの襲来 6

Science Plaza

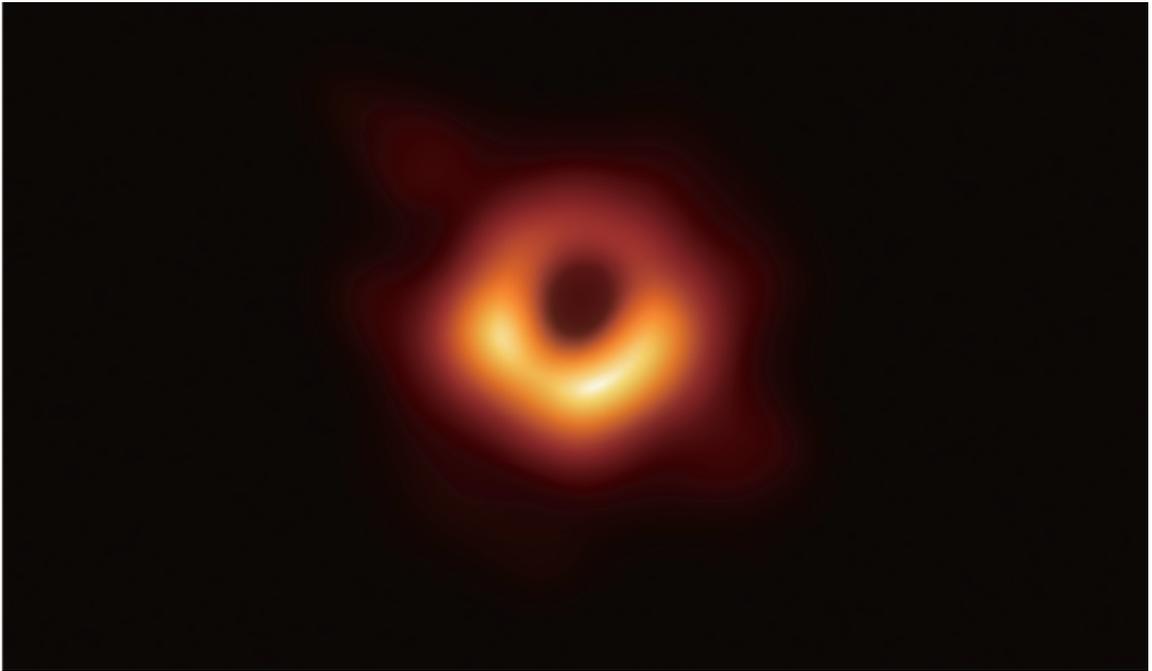
氷を通してみる化学の世界 14

連載

研究で君が光り輝くために 第4回 20

高校生へ私が選んだ1冊の本

分かちあう心の進化 24



▲図1
M87 銀河の中心にある巨大ブラックホール。ドーナツ状の構造はブラックホール周辺に巻き付いた光で、中心部の穴がブラックホールの影。
撮影：EHT Collaboration

2. ブラックホール撮影の意義

ブラックホール研究の出発点はアインシュタインが生み出した、相対性理論（一般相対性理論）という物理学の理論になります。アインシュタインは、質量があると周りの時間と空間が歪むことを式で表しました（アインシュタイン方程式）。その方程式の解（答え）を見つけたのが、ドイツの天文学者シュバルツシルトです。その解によると、質量を持った点に近づき過ぎると、光も物質も外に出られなくなることが示されました。これによって、ブラックホールの存在可能性が数学的に指摘されたのです。1916年のことです。

ブラックホールの大きさ（半径）はシュバルツシルト半径と呼ばれます。地球と同じ質量の場合、ブラックホールの半径は約 0.9 cm（地球の実際の半径は約 6,300 km）、太陽と同じ質量の場合でも半径は約 3 km（太陽の実際の半径は約 70 万 km）になります。天体を非常に小さく潰さない限り、ブラックホールを作るのは難しく、実際アインシュタインもシュバルツシルトも、このような天体が実在するとは信じて

いませんでした。

一方、20 世紀初めごろ、天文学者たちは銀河という天体の研究を進めていました。当時最大級の口径 1 m 程度の光の望遠鏡を使って銀河の写真を撮り、その距離や性質・構造などを調べていたのです。当時は銀河がどれくらい離れているのか不明で、天の川の中の天体なのか、天の川の外の天体なのかもわかっていませんでした。そのころ一部の研究者が、銀河によっては中心部がひと際明るく輝いているものがあることに気が付きます。M87 銀河も、そのような中心部がひとときわ明るい銀河の 1 つでした。さらに M87 では、中心部からジェット¹⁾が出ていることも見つかりました（1918 年）。これらの観測結果から、「銀河の中心には何があるのか？」という大きな疑問が生まれました。

その後の 100 年の間に無数の研究がなされた結果、「銀河の中心には巨大なブラックホールが存在する」ことは疑いようがない状況になっていました。例えば、銀河の中心に隠れている天体の重さをはかると、太陽の 100 万倍を超えるような重い天体の存在が示唆さ

1) ブラックホールは強い重力で周囲の物質を吸い込む反面、吸い込み切れない一部の物質をジェットとして光速に近い速度で噴出させている。

れ、しかもそれが光をほとんど出さないから、巨大ブラックホールだろうと考えられました。また、X線や重力波の観測から、恒星程度の重さのブラックホールの存在も確認されました。しかし、これらの研究でもできなかったことが、「ブラックホールを見ること」です。ブラックホールは光さえ脱出できない暗黒の天体であるはずですが、それを視覚的に捉えた証拠がなかったのです。今回私たちが撮影した写真は、ブラックホールの研究の開始以来100年後にとうとうその存在を視覚的に証明した、ということになります。「百聞は一見に如かず」という諺にもあるように、見ることはやはり重要なのです。

3. イベント・ホライズン・テレスコープ

今回のブラックホールの撮影には、世界中の電波望遠鏡をつなぎ合わせて合成するVLBI（超長基線電波干渉計）という技術が使われています。観測には世界6か所にある8台の電波望遠鏡を用いました（図2、図3）。各望遠鏡で天体を同時に観測してそのデータを記録し、観測後にそれを1か所に集めて掛け合わせます。そうすると、望遠鏡の広がりと同じ大きさの巨大な望遠鏡を合成することができるのです。今回の観測で使われた望遠鏡は最大で10,000 km以上も離れていますから、まさに地球サイズ（地球の直径は約13,000 km）の望遠鏡ということになります。

大きな望遠鏡を合成する最大のメリットが何かというと、細かいものを見分ける力（＝視力）が向上す

ることです。視力は、波長と望遠鏡の大きさの2つの量で決まり、波長が短いほど、また、望遠鏡が大きいほど、視力が良くなります。今回は直径10,000 kmの望遠鏡を使い、波長1.3 mmの電波で観測することで、人間の視力に換算して「300万」という、人類史上最高の視力を達成しました。それによってはじめてブラックホールの影の撮像ができたのです。図1のドーナツ状の構造がどれくらい小さいものかということ、ちょうど月面上に置かれたテニスボールを地球から見たときの大きさになります（見かけの大きさ約1億分の1度）。それだけ小さい天体だからこそ、これまでなかなか写真にとることができなかったのです。

4. スパースモデリングによる画像処理

今回の画像処理では、3つの画像解析手法が使われています。どのような方法でやっても同じ答えが出ることを確認するためです。その3つのうちの1つが、日本チームが中心になって開発した、スパースモデリングによる画像解析法です。最終的に発表されたブラックホールの影の写真は、スパースモデリングを含む3つの解析方法の結果を平均したものです。

さてスパースモデリングを一言で言えば、「これまで解けないと言われてきた式を解く」方法です。皆さんは中学校で習った連立方程式というもの覚えていらっしゃるでしょうか？2つの未知数（例えば x, y ）がある場合、方程式を少なくとも2本立てないと x と y の値が求まりません。これは未知数がさらに多い場合でも



▲図2
チリのアタカマ高地にあるALMA（アルマ）望遠鏡。ブラックホール撮影に使われた電波望遠鏡の1つで、ALMAの複数の電波望遠鏡を合成して1台として使った。
提供：ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

同じで、未知数が100個なら方程式は100本以上、未知数が1万個なら式は1万本以上必要です。ブラックホールを撮影する場合、求めたい画像のそれぞれのピクセル（画素）が未知数になるので、電波望遠鏡で得られる情報から連立方程式を作ります。しかし、望遠鏡は地球上にまばらにしか存在していないので得られる情報量には限界があり、そのために方程式の数が足りない状態になってしまうのです。

このような方程式の数が足りない連立方程式は、実は答えが「無い」のではなく、方程式を満たす答えが「無数にある」状態に陥ります。そこで、その答えの中から、さらに別の条件を課すことで最も適切な答えを選ぶことができれば、正解にたどり着くことができます。そのため、スパースモデリングでは解の「疎性」（すかすかな状態を表し、英語では sparse といいます）というものに注目し、課す条件とします。例え

ば、ピクセルの中には実は0がたくさんあるとすると、それは「疎な解」になります。あるいは隣り合ったピクセルがだいたい同じ値を持つとすると、隣との差がほぼ0になり、やはり「疎な解」と言えます。このような疎な解であるという条件を課すことで、正しい答えにたどり着けることが、最近の数理とコンピューターの進歩で分かってきたわけです。私たちはそのような手法を応用して今回の画像解析に使ったのです。もちろん、このような方法は使い方を間違えると変な答えを返すこともあるので注意が必要です。実際、私たちの研究では、試験用の画像を使って何万枚もの画像解析を行い、私たちの画像解析方法が正しく動作することを確認しています。1枚の写真を得るために、その裏では何万回という試行錯誤が行われているのです。



▲図3 イベント・ホライズン・テレスコープの局配置図。世界6か所8台の電波望遠鏡を使って、地球規模の巨大な望遠鏡を合成した。提供：EHT Collaboration

5. 今後の展望

今回ブラックホールの影が無事に撮影されたことで、ブラックホールの観測研究は新時代に突入したといえます。今後ブラックホールの傍で起こる現象を直接見て調べることができるようになったからです。ですので、イベント・ホライズン・テレスコープは今後もブラックホールの観測を継続して行っていく予定です。

今後近いうちに期待される研究展開の1つが、M87とは別のブラックホールである、いて座Aスターの撮影です。この天体は、我々の天の川の中心にある巨大ブラックホールで、太陽の400万倍の質量を持っています。その見かけの大きさもM87と同程度と推定されているので、イベント・ホライズン・テレスコープにとってM87と並んで重要な観測対象です。2017年4月の観測の際に、いて座Aスターの観測も行われていて、今まさにデータの解析が進行中です。2つ目のブラックホールの影が撮影されれば、当然ブラックホールごとの個性が見えてくるはずですが。例えばいて座AスターはM87と異なりジェットを出していませんが、そのような性質の違いが写真としてどうとらえられるのか、大変楽しみです。

また、ジェット研究については、今回撮影されたM87の写真にジェットの根元が写りませんでした。これはちょっと意外で、ブラックホールとジェットの関係の解明が今後の宿題として残されました。2020年以降、イベント・ホライズン・テレスコープはさらに局数を増やした観測を行う予定です。2017年の観測は6カ所8台の望遠鏡(図3)でしたが、今後新たに3つの望遠鏡が加わり、9カ所11台の装置になる予定です。そうすればより暗い構造が写るので、ジェットの根元も見えてくるのではと期待されます。すると、ブラックホールとジェットの根元の位置関係が明らかになり、ブラックホール近傍でジェットがどのように加速されて飛ばされていくのかの理解につながります。その中でも特に注目されているのが、ブラックホールの「回転」の役割です。ブラックホールはそれ自身がコマのように回転することができ、そして回転するブラックホールからはエネルギーを抜き出すことができるという理論的予想があります。光も物質も出てこないはずなのにエネルギーは出てきてもし

い、というのがまた大変不思議なところです。実は現在理論的な研究から、ジェットはブラックホールの回転と関係しているという説が有力で、ジェットの根元の研究がブラックホールの回転やエネルギーの抜き出しなどの研究に進展する可能性が高いです。

そして、さらに長期的には、ブラックホールを動画として撮影したいと、私も含めた多くのプロジェクトメンバーは考えています。今回の写真は静止画でしたが、それが動画になればさらに大きなインパクトを研究に与えるはずですが。実際ブラックホールの周辺では、ガスが回転しながらブラックホールに吸い込まれたり、落ちきれなかったガスの一部がジェットとして吹き飛ばされたり、たいへんダイナミックな現象が常に起きています。その様子を動画としてとらえることができれば、ブラックホールの動的な姿をより深く理解することができます。この実現にはデータの蓄積が必要なのでさらに時間がかかるとは思いますが、長期的な展開として非常に楽しみです。

6. むすびに

最後にこの文章をまとめるにあたって、ここまで読んでくれた読者の皆さんにメッセージを書きたいと思います。私たちは今回ブラックホールの撮影に成功したわけですが、それには10年もの時間が必要でした。その間には多くの失敗もありましたが、それを生かしながら諦めることなく研究を続けて、今回このようなすばらしい成果を得ることができました。苦勞もある中で私たちが研究を続けられた最大の原動力は、それが「好き」だったからに他なりません。宇宙の謎やブラックホールの姿を明らかにしたい、という強い思いを多くの研究者が持ち続けたからこそ成し遂げられたのだと思います。皆さんも好きなことを見つけ、是非それに打ち込んでみてください。そのような体験は皆さんの人生をきっと豊かなものにしますはずですよ。