

特集1

天の川銀河中心ブラックホールの撮影

小山翔子（新潟大学自然科学研究科）、Event Horizon Telescope Collaboration

1. ブラックホールとは

ブラックホールは強い重力場によって光さえ脱出できない暗黒の天体である。アインシュタインは今から100年以上前の1915年に一般相対性理論を発表し、強重力場での時空の歪みを記述するアインシュタイン方程式を導き出した。その直後にシュワルツシルトは球対称時空の条件で方程式の解を求め、光さえ脱出できない領域の存在を予言した。その領域の半径をシュワルツシルト半径といい、ブラックホール質量に比例することが導かれた。

ブラックホールは質量によって分類できる。軽い部類の恒星質量ブラックホールは太陽の数十倍程度の重さがあり、星の中で起きる核融合反応によって元素が燃え尽きた後に形成されると言われている。一方で重たい部類のブラックホールはどのようにできるのかまだよくわかっていない。しかし太陽の数百から数十億倍もの超大質量ブラックホールであれば、その質量に応じて半径が大きいため観測しやすい。宇宙には無数のブラックホールが存在するが、ほぼ全ての銀河の中心には超大質量ブラックホールが存在すると考えられているため、銀河の中心を狙えばブラックホールを撮影できる可能性がある。

2. ブラックホールの撮影

2.1 ブラックホールシャドウについて

光さえも脱出できないブラックホールの御本尊を観測することはできない。しかしブラックホールの背後にあるガスや塵が光ることによってブラックホールは影（シャドウ）として観測できると予想された。ブラックホールの強重力場によって周囲の時空は歪み、本来は直

進する光の軌道は曲げられて束となり光のリングとして観測される（図1）。ブラックホールシャドウを観測することがより直接的なブラックホールの証拠になると考えられた一方で、見かけの大きさが小さすぎて形を見分けられるような観測装置が存在しないという課題があった。

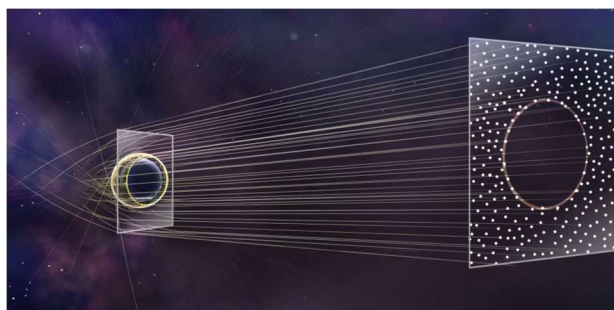


図1 強重力場によって光の軌道が曲げられ、ブラックホールシャドウができる様子の概念図 (Credit: NRAO/AUI/NSF)

2.2 観測装置について

どのような観測装置があればブラックホールを撮影できるのか。見かけが最大のブラックホールでも、構造を見分けるためには約1千万分の1度、あるいは約40マイクロ秒角という微小な角度を見分けることができる高い視力を持った観測装置が必要であった。人間の視力1.0を基準とするとその約300万倍、月面上に置いたみかんを見分けられるほどの視力と言われる。望遠鏡がどれだけ小さいものを見分けることができるかという能力を分解能として表すが、数値として小さい方が能力が高い。分解能は観測波長に比例し、望遠鏡の口径に反比例するため、波長は短く、口径は大きいほど分解能は高い。仮に地球サイズの望遠鏡を作ることができると、波長1mm

で観測することでブラックホールシャドウの形を見分けることができる。

地球サイズの望遠鏡は、電波干渉計の技術によって実現可能である。一つの望遠鏡の口径は数十 m しかなくても、離れた場所に置いた複数の電波望遠鏡を同時に同じ天体に向けて受信した電磁波を干渉させることができると、離れた距離を口径とする望遠鏡相当の分解能を得ることができる。望遠鏡間の距離を離せば離すほど分解能は高くなり、望遠鏡の数を増やすほど画質は良くなる。しかし、出来上がった仮想的に巨大な望遠鏡の鏡面を全て望遠鏡で埋め尽くすことは不可能であるため、穴だらけの望遠鏡であると思うと、暗い構造や天体を見分けることは不得意である。

電波望遠鏡間の距離を数百から数千キロメートル離れた観測装置を超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometry: VLBI) という。日本にある代表的な VLBI の一つは、国立天文台水沢 VLBI 観測所に属する VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) であり、20m の望遠鏡 4 台で構成される。最長基線長は岩手・水沢局と沖縄・石垣局の間で 2300km ある。典型的な観測波長は 1cm であるため、分解能は約 1 ミリ秒角にもなるが、それでもブラックホールシャドウを撮影するにはさらに数十倍の分解能が必要であった。

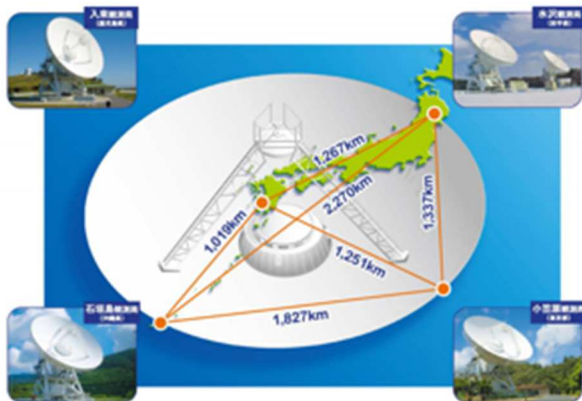


図 2 国立天文台水沢 VLBI 観測所・VERA の望遠鏡配置図

イベント・ホライズン・テレスコープ (Event Horizon Telescope: EHT) は、波長 1mm で観測できる電波望遠鏡を地球上にちりばめ、仮想的に地球サイズの観測装置を作成した (図 3)。北はグリーンランド、南は南極まで、現在は 11 局の望遠鏡で構成されている。2017 年 4 月に世界 6 カ所 8 局の望遠鏡が揃い、EHT として最初の観測が行われた。



図 3 現時点で EHT に参加している望遠鏡

2.3 観測天体について

ではどんなブラックホールなら地球から撮影できるのだろうか。サイズが大きいほど見やすいため、なるべく質量の大きい超大質量ブラックホールを選ぶと良い。さらに我々に最も近い超大質量ブラックホールと言えば、私たちの住む天の川銀河中心にあるブラックホールである。銀河系中心部には、いて座 A* (エースター) と呼ばれる超大質量ブラックホールの存在が示唆されていた。2020 年にノーベル物理学賞を受賞したゲンツェル博士・ゲッツ博士らがそれぞれ率いるチームは、20 年以上に渡り赤外線で見つめ、銀河系中心部にある星々の運動を追跡した。星の軌道焦点には太陽質量の約 400 万倍のコンパクトな天体が存在することがわかった。EHT は一番内側の星よりもさらに約千倍小さい領域を分解して、

ブラックホール直近の様子を撮影することを試みた。2番目の撮影候補天体は、おとめ座にある楕円銀河 M87 の中心にある超大質量ブラックホールである。質量は太陽の約 30-60 億倍と見積もられていた。EHT はいて座 A* と M87 の超大質量ブラックホールを目標天体として観測を行った。

3. ブラックホールの画像

EHT は 2019 年 4 月に M87 の超大質量ブラックホール、2022 年 5 月にいて座 A* の画像を公開した[1,2,3,4]。どちらの画像も単なる丸ではなく、中心部が暗いリング状の構造が見える(図 4)。見かけの大きさはいて座 A* の方がわずかに大きいがほとんど同じ大きさである。これは、いて座 A* の質量と半径は M87 ブラックホールの約 1600 分の 1 である一方、約 2100 倍も私たちに近い場所に位置するからである。リングの実際の大きさは、いて座 A* と M87 ブラックホールそれぞれで、太陽質量の約 400 万倍と約 65 億倍であった場合に一般相対性理論から予測されるサイズとよく一致していた。ブラックホールの存在を視覚的に証明した結果であると言えよう。

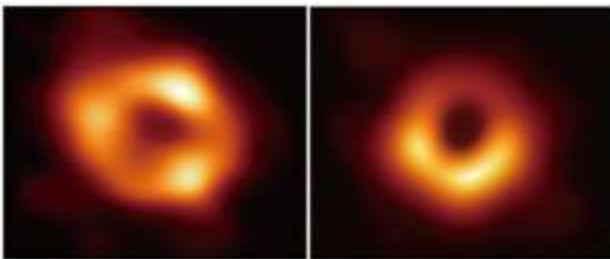


図 4 EHT が撮影した 2 つの巨大ブラックホールの画像。(左図) 2022 年に公開された天の川銀河中心(いて座 A*) の巨大ブラックホール。(右図) 2019 年に公開された楕円銀河 M87 の中心にある巨大ブラックホール。(Credit: EHT Collaboration)

4. 今後の展望

EHT は 2017 年 4 月の観測以降もネットワークを拡張させながら観測を続けている。2018 年にはグリーンランド望遠鏡(図 5)が参加し、2021 年からはフランスとアメリカから新たに望遠鏡が加わった。望遠鏡の数が増えると画像がさらに高画質になり、暗い部分も鮮明に見えるようになることが期待されている。これにより、ブラックホール周辺から高速で噴き出されるジェットと呼ばれるガスの存在有無が調査できるようになるだろう。さらに 1mm よりも 1/1.5 短い波長での観測も試みが始まっている。分解能が現在の約 1.5 倍になり、ブラックホールの輪郭がより鮮明になることで一般相対性理論の更なる検証に繋がる。画像を撮りためていくことで静止画から動画へと移行し、ブラックホール周辺のガスの動きが見えてくるだろう。銀河の成り立ちと中心ブラックホールの間にはどのような関係があるのか、研究が進展する中でヒントが得られるかもしれない。今後も EHT の成果をご期待いただきたい。



図 5 グリーンランド望遠鏡 (GLT) (Credit: 陳明堂)

文 献

- [1] EHT Collaboration *et al.*: First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I-VI. *Astrophysical Journal Letters*, 930, L12-17 (2022)

-
-
- [2] EHT Collaboration *et al.*: First M87
Event Horizon Telescope Results. I-VI.
Astrophysical Journal Letters, 875, L1-
L6 (2019)
- [3] 天文月報 2022年8月号 ASTRO NEWS
[https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/
/2022/entry820.html](https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/2022/entry820.html)
- [4] 天文月報 2019年7月号 ASTRO NEWS
[https://www.asj.or.jp/geppou/contents/20
19_07.html](https://www.asj.or.jp/geppou/contents/2019_07.html)



小山 翔子

* * * * *