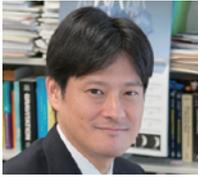




## 2020年ノーベル物理学賞



～天の川銀河中心のブラックホールの存在確認～

国立天文台 教授  
水沢 VLBI 観測所 所長  
本間 希樹

2020年のノーベル物理学賞がブラックホールの研究に重要な貢献をした3名の研究者に与えられました。その中でも天の川銀河中心のブラックホールの存在を観測的に示したゲンツェル、ゲズ両氏の研究を中心に解説し、あわせて筆者たちが国際協力で行ってきたブラックホール撮影との関係も述べたいと思います。

### 1. ゲンツェル、ゲズ両氏の業績

ゲンツェル、ゲズの二人はそれぞれの研究グループを率い、大型望遠鏡を用いて天の川の中心の星の運動観測を長年にわたって行ってきました。天の川銀河の中心にブラックホールが本当に存在するのかが確認するためです。

天の川銀河のような銀河の中心には一体何があるのか、という疑問は100年ほど前から天文学者が追いつけてきたものです。20世紀初頭、大型望遠鏡（当時は口径1～2mクラス）で銀河の写真を撮ると、中心部が明るく輝いていたり、ジェットが出ていたりすることが発見されました。それ以来、天文学者は「銀河の中心は特別な場所で、普通ではない天体が潜んでいるのでは？」と考えてきたのです。

1960年代にクェーサーのような非常に明るい銀河中心核が観測されるようになると、銀河の中心はブラックホールなのではと考えられるようになります。ブラックホールに物を落とすと、重力エネルギーが解放されて莫大なエネルギーが得られる（落ちる水で水力発電ができるのと同じ原理）ので、このような明るい天体を説明するのに好都合だからです。そして、その後銀河の真ん中の星やガスの動きを観測から測定することで、巨大なブラックホールが存在する証拠が複数出てきました。日本では、野辺山宇宙電波観測所での観測により、NGC4258という銀河の中心に高速回転するガス円盤が見つかりました。これは1993年に中井直正らが発見したもので、この銀河の中心に太陽

の400万倍もの質量をもった巨大なブラックホールが存在する可能性が示されたのです。

このような流れを受けて、天の川銀河の中心にも巨大ブラックホールがあるのでは、と多くの人が考えるようになりました。それを確認するためには、天の川の中心にある星々の運動を測定し、それらが中心の天体からどれくらいの重力で引っ張られているかを測定する必要があります。しかし、太陽系から天の川の中心までは2万5000光年も離れており、しかもその途中にある天の川内のガスやチリによって天の川の中心から来る光が吸収されてしまい、観測は非常に難しいのです。そのため、大きな望遠鏡が必要となり、かつ光の吸収が少ない赤外線での観測が必要でした。ゲンツェルたちドイツのグループはチリにあるNTT (New Technology Telescope) やVLT (Very Large Telescope) などの望遠鏡を、またゲズらは米国ハワイにあるKeck望遠鏡を用いて、長期にわたって観測を行いました。ただ観測をするだけでなく、測定精度を極限まで向上させるために、大気による星のまたたきを補正する補償光学という技術の開発も行っています。

図1は、天の川の中心の星々が写っている写真です（ゲンツェルらの観測結果）。この中心部だけを切り出し、さらに10年以上かけて測定した星々の動きを模式的に示したのが、図2です。天の川の中心近くの星たちは猛スピードで動いており、その速度は最大秒速数千kmにも達します。

これらの星々の動きから、中心に隠れている天体の質量を求めることができます。実際、2つのグループの研究から天の川の中心には、太陽の400万倍もの質量を持つ天体が存在することが判明しました。しかも、このような巨大な質量を持った天体があるにもかかわらず、その天体は写真に写っていません（仮に太陽が400万個あったら必ず写真に写ります）。ですので、この天体は非常に重たい質量を持っているが、

光はほとんど出さない天体ということになり、そのもっとも自然な候補は、巨大なブラックホールということになるのです。

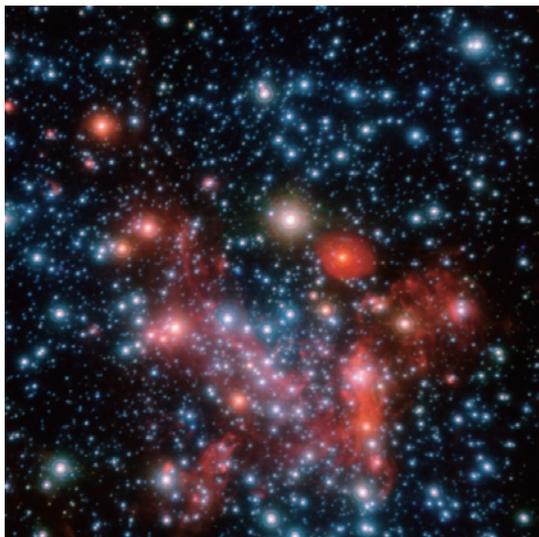
これらの結果は、ドイツのゲンツェルと米国のゲズ、お互いのグループがお互いに競争しながら得られたものです。お互いにライバルの存在があったからこ

そ、さらに良い結果を出そうと切磋琢磨して、研究が進んできました。そのおかげで、天の川の中心の巨大ブラックホールの存在が確実になり、そして両者がノーベル物理学賞受賞となったわけです。強力なライバルとの競争も、科学の進展にとっては重要なのです。

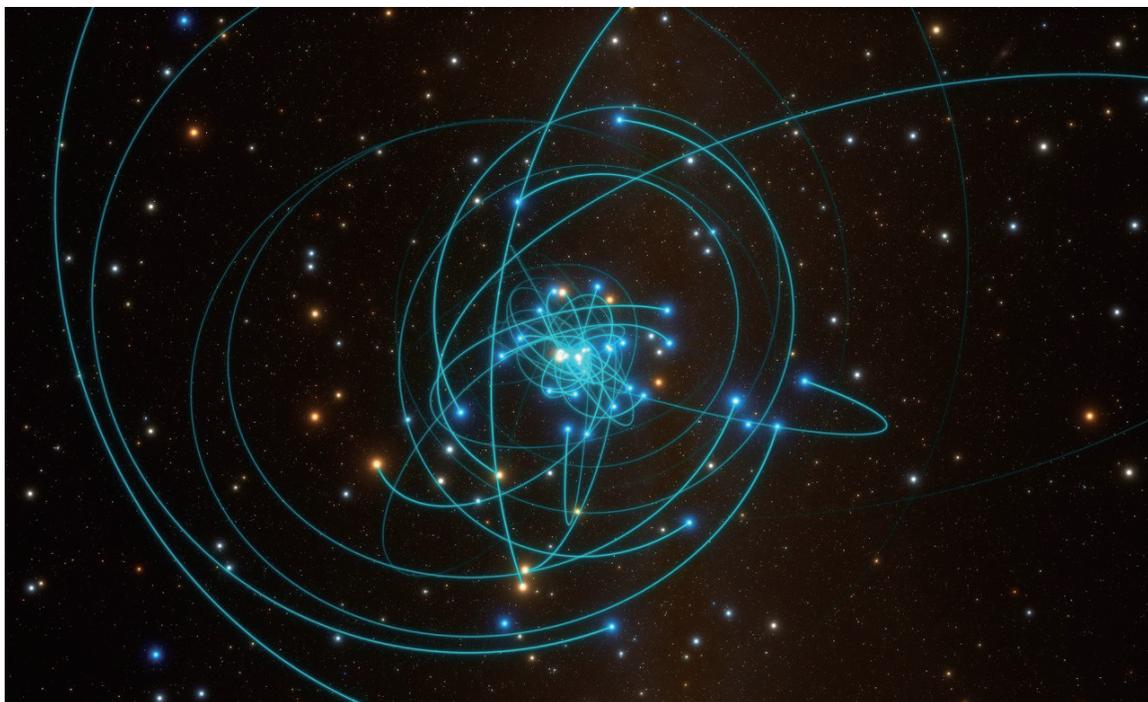
## 2. EHT とのつながり

ゲンツェル、ゲズ氏らの天の川中心のブラックホールの研究は、筆者らがこれまで進めてきた EHT (Event Horizon Telescope) によるブラックホール撮影の研究とも大いに関係があります。2000 年前後には、彼らの結果によって天の川中心のブラックホールの存在が確からしくなってきました。しかし、彼らの赤外線の写真にはブラックホール本体が写っていません。ですので、その中心が本当にブラックホールなのか、実際に見て確認することが必要だったのです。彼らに見て確認することが必要だったのです。彼らの観測でブラックホールがあるとされる場所には、「いて座 A スター」という電波天体があったので、電波で観測すればブラックホール本体（厳密にはその周辺のガス）が見える可能性が出てきたのです。

ゲンツェル・ゲズ両氏の結果から、巨大ブラックホールの質量が求まったことも重要なポイントでした。質量が決まると、ブラックホールの大きさもそれに比



▲ 図 1 チリにある VLT 望遠鏡が捉えた天の川銀河の中心部の星々。視野の中心に天の川の巨大ブラックホールが隠れている。(Credit: ESO/S. Gillessen et al.)



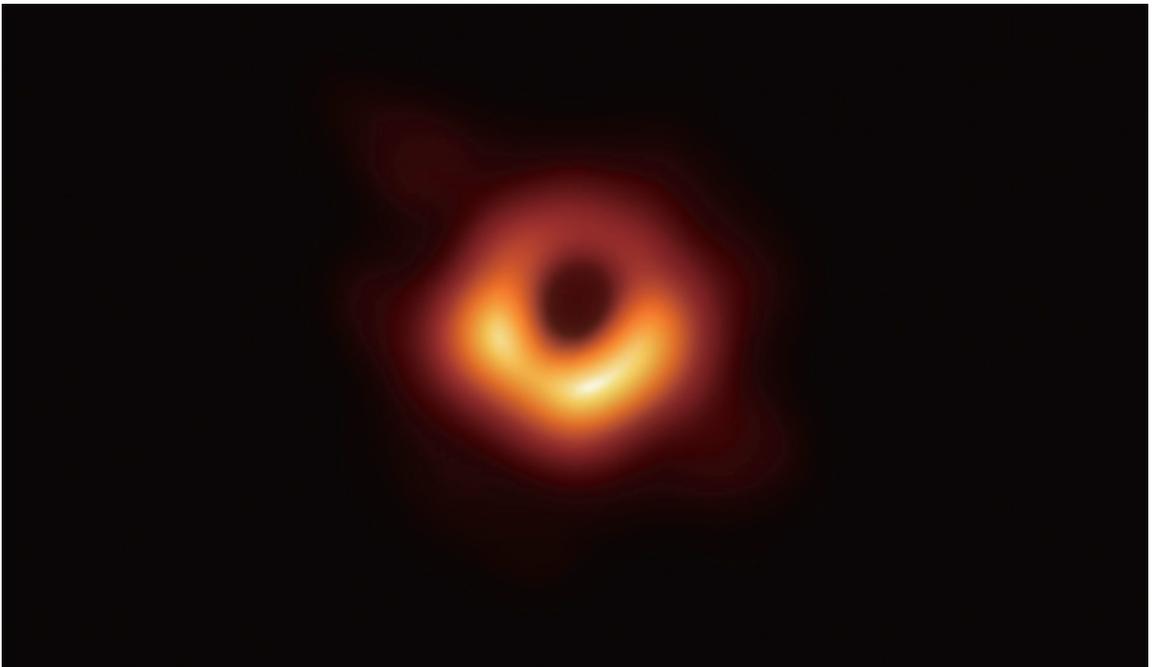
▲ 図 2 天の川中心の巨大ブラックホールの周辺の星々の動きを表す模式図。(Credit: ESO/L. Calçada/spaceengine.org)

例して決まります。質量が太陽の400万倍で、その天体が2万5000光年先にあると、その見かけの大きさはおよそ1億分の1度となります。これは途方もなく小さな角度で、月の上に置かれたテニスボールを地球から見こむときの角度に対応します。このような小さな天体を観測するには非常に高い視力が必要です。その姿を実際に捉えるのは簡単ではありません。しかし、彼らの研究成果によって、次に目指すべき視力の到達点が明確になったのです。

視力は望遠鏡の大きさと観測する光や電波の波長の比で決まり、望遠鏡を大きくすればするほど、また波長を短くすればするほど、視力を高くすることができます。超長基線電波干渉計（VLBI）の技術を使って地球の直径とほぼ同じ1万kmの望遠鏡を作った場合、ブラックホール撮影に必要な波長は1mm程度と求まります。つまり、天の川中心のブラックホールの質量が求まったことで、ミリ波帯で地球規模のVLBI観測を目指すことがこの分野の大きな流れとなったのです。そして、10年以上の歳月にわたる数百人規模の国際協力によって、2017年4月にEHTによる初めてのブラックホールの撮像観測が実現し、その後2年の解析を経て、2019年にM87のブラックホールの影の写真が公開されたのです（図3）。この影の検出により、銀河の中心に巨大なブラックホー

ルが存在することが決定的となりました。

ところで、EHTが公開した写真は天の川の中心にあるいて座Aスターのものではなくて、天の川とは別の楕円銀河M87の巨大ブラックホールでした。EHTの観測でも、いて座Aスターはもちろん最重要ターゲットでした。一方、M87もそれに並ぶ重要なターゲットです。なぜなら、見かけの大きさがいて座Aスターの8割程度と、だいたい同じだったからです。実際、2017年の観測でも2天体とも観測されています。では、なぜM87の方が先に公開されたかということ、そこにも科学的な理由があります。M87の巨大ブラックホールはいて座Aスターに比べて約1500倍重く、しかし、距離が2000倍遠いために、両者がほぼ打ち消し合って、だいたい同じ大きさに見えます。しかし、M87の方が実際は質量も大きさもずっと大きいので、ブラックホールの周辺をガスや光が一周する時間もずっと長く、中心からの距離にもよりますが、その時間は数日程度になります。一方のいて座Aスターでは数分程度です。この差は観測する上では決定的な違いをもたらします。電波干渉計では、天体が昇ってから沈むまでの8～10時間ほどかけて写真を撮影します。つまりカメラのシャッターを8～10時間、開けっ放しにしているということです。その間にもし相手が動いてしまえば当然ぶれてしまうため、写



▲図3 EHTが撮影した楕円銀河M87の中心の巨大ブラックホール。(Credit: Event Horizon Telescope Collaboration)

真にするのが難しくなります。いて座 A スターではこのような「ぶれ」が避けられませんが、M87 では大丈夫です。そのため EHT では最初により確実な M87 の写真を発表したのです。

EHT の結果が公表されたのは 2019 年 4 月のことで、発表されるとブラックホールを「黒い穴」として初めて視覚的に捉えた写真が世界中で大きな話題になりました。この写真が巨大ブラックホール存在の決定的な証拠となったことで、それを受けて 2020 年のノーベル物理学賞がブラックホールの研究者に与えられました。EHT の研究の出発点には、ゲンツェルとゲズの成果があり、そしてその EHT の成果が両者のノーベル物理学賞受賞を後押ししたのです。

### 3. ペンローズ、そしてホーキングについて

ゲンツェル・ゲズ両氏と同時にノーベル物理学賞を受賞したもう一人はイギリスのペンローズです。ペンローズは先の二人とは違い、理論的な研究を行ってきた人物です。1960 年代に、宇宙に特異点（＝ブラックホールの中心にある大きさ無限小で密度が無限大の点）ができるかを理論的に調べ、一般相対性理論の枠組みで実際に特異点が形成されることを示しました。つまり、ブラックホールは宇宙で形成可能ということです。ブラックホールの存在可能性は、アインシュタインによる一般相対性理論誕生直後（1916 年）から数学的な解として指摘されてきましたが、当時はあくまで数学上の話であり、実際にそのような不思議な天体が宇宙に存在するとは考えられていませんでした。実際、アインシュタイン自身がブラックホールの存在を否定する論文を書いているほどです。何でも吸い込んで二度と出さないブラックホールという天体は、それほどまでに「信じがたい」存在だったのです。

しかし、ペンローズの研究によって、天体が重力で支えきれなくなって潰れてしまうとブラックホールができることが示され、宇宙で実際にそのような天体があるのではと考えられるようになります。また、同じころ、X 線の観測から天の川銀河内に恒星質量ブラックホールの候補が見つかり、さらには、宇宙のはるか遠方で明るく輝くクェーサーの正体としても巨大ブラックホールの可能性が指摘されました。このように 1960 年代のペンローズの研究やその他の観測によって、ブラックホールは SF の世界の存在から現実

の宇宙の存在へと変わっていったのです。

ペンローズに関連してもう一人、ホーキングのことも少しだけふれておきます。ホーキングもペンローズと一緒に宇宙で特異点ができるかという問題に取り組んで成果をあげてきました。さらに彼は、ブラックホール近くでの量子力学的な揺らぎを考え、実はブラックホールは光を放出して最終的に蒸発するのでは、という驚くべき予言もしました。現段階ではまだこのホーキングの予言は確認されていません（蒸発にかかる時間があまりに長い）。しかし、ホーキングがブラックホール研究に残した業績もまた素晴らしいものであり、もし存命であればノーベル賞受賞の可能性も十分あったと私は思います。ALS との闘病の末、ホーキングが亡くなったのは 2018 年、一方 EHT によるブラックホールの写真の発表は 2019 年ですので、この辺りの順序が少し違ったものになっていれば、ホーキングもノーベル物理学賞を受賞、ということがあったかもしれません。

### 4. EHT の今後の展望

最後に私たちの EHT による今後のブラックホール研究の展開についても簡単に触れて終わりにしたいと思います。ブラックホールの影が直接見える時代になったことで、ブラックホールに関連した現象の理解が今後さらに進むと期待されます。例えば、ブラックホールの周辺のガスの動きなどを見ることで、ブラックホールの回転について計測することができると期待されます。「回転しているブラックホールからはエネルギーを取り出すことができる」、ということがペンローズによって予想されており、ブラックホール周辺から出るジェット of 駆動エネルギー源になっている可能性も指摘されています。今後ジェットの根元も含めてより詳しい写真や動画が得られれば、ペンローズの予想が正しいか、検証できるようになるでしょう。また、複数のブラックホールの影が撮影されれば、ブラックホールごとの個性も見えてくると期待されます。このように、これから先、ブラックホール研究はまだまだ面白い問題が未解明で残されており、今回のノーベル物理学賞を弾みにして、さらにこの分野が盛り上がっていくことを期待したいと思います。この文章を読んでいる高校生の中からも、今後のブラックホール研究を担う研究者が出てくることを願っています。