

# 2020年ノーベル物理学賞，我々の 天の川銀河の中心にある 超大質量コンパクト天体の発見



三 好 真

〈国立天文台・ジャスミンプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉  
e-mail: makoto.miyoshi@nao.ac.jp

2020年のノーベル物理学賞，物性関連だろうという大概の予想に反し，2019年に続いて天文学に関するものであった。3人の受賞者のうち，ドイツのゲンツェル（R. Genzel）と米国のゲッツ（A. M. Ghez）の受賞理由は「我々の天の川銀河の中心にある超大質量コンパクト天体の発見」である。わかりやすく言い換えると「ブラックホールを見つけた」ということだ。これに関して解説をする。実は日本でもこれらに匹敵する関連研究があるのでそれも紹介する。

## 一番近い巨大ブラックホール， 射手座Aスター

我々の天の川銀河の中心には巨大ブラックホール（射手座Aスター，以降Sgr A\*）がある。地球から銀河中心までの距離は約8 kpcであり，よその銀河までの距離と比べて桁違いに近い。可視光で銀河中心を観測できれば，Sgr A\*がブラックホールであることはもっと早くにわかったであろう。しかし，ご存じのように星間ダストによる吸収のため，銀河中心の観測は可視光観測ではできず，銀河中心を見るにはそれ以外の波長，電波，赤外線，X線などでの観測が必要だった。今回話題の天体，Sgr A\*は，電波観測で見つかる。電波干渉計によって銀河中心の複合電波源，Sgr A領域の中にコンパクトな電波源として BalickとBrownが1974年に発見した [1]。この観測でその見かけの大きさは0.1秒角（実サイズは800天文単位に相当）よりも小さく，観測輝度温度は $10^7$  Kを超えた。これはブラックホールではないかと示唆された。なお，観測天文学において，こ

れはブラックホールではないかと最初に報告したのは小田稔（1971）である。それまで天文学者にとって，ブラックホールは想像上のものであり観測天文学の対象ではなかった [2]。

## 銀河中心の恒星の運動観測

ドイツのゲンツェル（R. Genzel）とエックルト（A. Eckart）たちは，1990年代からチリにあるESO（欧州南半球天文台）の口径3.5 mの新技术望遠鏡（New Technology Telescope, NTT）を使い，波長 $2.2 \mu\text{m}$ の近赤外線観測を行って銀河中心付近の恒星の固有運動の測定に取り組んだ。Sgr A\*の周囲にある恒星の運動を調べることで，Sgr A\*の質量，さらに内包体積での密度を測ることができる。観測当初の赤外線での観測では空間分解能は150 mas (milli-arcsecond, ミリ秒角) から50 masにすぎなかった。我々の天の川銀河の中心は，ほかの銀河にある巨大ブラックホール候補よりも1,000倍も近くにある。そのため現在最高の空間分解能を出せるVLBI（超長基線電波干渉計）のそれより100倍悪くても，我々の天の

川銀河中心部分での天体の運動を十分よく観測できることになる。彼らはスペックル像合成法を用いて、回折限界 150 mas の空間分解能を達成した観測を行った。1996年には銀河中心から 0.4 pc (パーセク, 3.26 光年) から 0.04 pc にある多数の恒星を観測し、39 個の星の固有運動の検出に成功した。それらの星の速度分散から、Sgr A\* の質量を  $(2.45 \pm 0.4) \times 10^6 M_{\odot}$  (太陽質量) と見積もった。これを密度に換算すると、1 pc<sup>3</sup> あたり  $6.5 \times 10^9 M_{\odot}$  になる。このときゲンツェルらは、銀河中心よりわずか 100 天文単位のところ、1,600 km/s もの高速運動をする恒星を 1 個発見した。この星の固有運動を正確に計測していけば、Sgr A\* がブラックホールであることはより堅固になると予想された [3]。

ところで、銀河中心から数光年の領域に存在する恒星の固有運動を追っていた研究グループはほかにもあった。ゲッツたちは、ハワイのマウナケア山頂に完成したばかりのケック 10 m 望遠鏡で、近赤外線 (波長 2.2  $\mu\text{m}$ ) を用い、約 50 mas の空間分解能で、1995 年から銀河中心の恒星の固有運動測定を始めた。最初の 2 年間のうちに 90 の星の固有運動の測定に成功、その後 1997 年から 1999 年までの観測から、それら 90 の星の固有運動のうち 3 つから加速度を検出した。つまり、恒星の運動は直線運動ではなく、曲がっていたのである \*1。

恒星が銀河中心のまわりを運動する様を、ついに捉えたのである。それらの星は、銀河中心からわずか 0.005 pc のところにある。これだけの距離になると、恒星が Sgr A\* から受ける加速度は、ちょうど地球が太陽から受けるのと同じくらい大きさである。しかも、3 つの恒星の加速度ベク

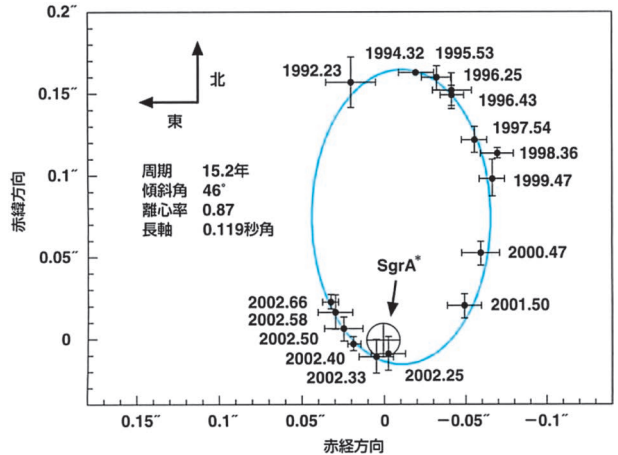


図1 我々の天の川銀河中心にある巨大ブラックホール Sgr A\* (2002 年の論文 [5] から)。矢印の先にある円がその位置を示す。このブラックホールのまわりを、恒星 S2 が 15.2 年の周期の楕円軌道上を運動している。恒星 S2 は 1992 年から 2002 年までに、この軌道の約 3 分の 2 を公転していた。十字印は赤外線での観測による星の位置の誤差。

トルは、誤差の範囲で 1 点に交差していた。3 つの恒星はすべて 1 つの重力源に引かれているのである。ゲッツたちは、Sgr A\* から 0.005 pc 以内のところ、 $(2.3\text{--}3.3) \times 10^6 M_{\odot}$  の質量があると推定した。これは 1 pc<sup>3</sup> あたり、 $8 \times 10^{12} M_{\odot}$  にあたる [4]。出し抜かれた格好になったゲンツェルたちのグループは、さらに ESO の口径 8 m の望遠鏡 VLT を使った観測を加え、S2 と名づけた恒星が Sgr A\* のまわりを 3 分の 2 周した結果を 2002 年秋に、発表した (図 1)。S2 星は公転周期 15.2 年、最近点 (Sgr A\* にもっとも接近する点) では Sgr A\* からわずかに 17 光時 (124 天文単位)、最遠点で 5.5 光日の楕円運動をしている。最近点近くにおける S2 の公転速度は、観測値として 6,600 km/s にもなった \*2。

ちなみに、地球の太陽に対する公転速度は

\*1 銀河内の天体はみな銀河回転しているのだから、当然それは直線運動ではない。が、その回転周期に対して短時間の観測から直線運動ではない固有運動を検出するのは難しい。

\*2 最近点における予想速度は約 8,000 km/s、光速の 3% にもなる。

30 km/sである。1992年から2002年までの11年の観測期間のうちに、S2星は最遠点から最近点を通り抜け、再び最遠点に向かっていった。実はSgr A\*の赤外線は弱くて、この当時では観測することはできなかった。だが、電波でなら見ることができた。そこで電波と赤外線の両方で観測できる晩期型星（電波ではそのメーザ電波をVLBI観測する）の位置を介して、10 masの精度でS2星とSgr A\*の位置関係を決めていた。なおSgr A\*の位置は、S2星の楕円軌道の焦点からずれている。ケプラー運動をするなら、中心天体は軌道構円の焦点の1つにあるはずである。実はこれは投影のトリックである。楕円を別の平面に投影した際、元の焦点と新しい楕円の焦点は対応しない。観測された楕円軌道は、本来の楕円軌道を天球面上に投影したものである。そのためSgr A\*は、図中の楕円の焦点には位置していない。この軌道運動から計測されたSgr A\*の質量は、 $(3.7 \pm 1.5) \times 10^6 M_{\odot}$ である。S2星の最近点（Sgr A\*から124天文単位）を半径とする球の体積の中にこれだけの質量があるとすると、密度は $1 \text{ pc}^3$ あたり $4.1 \times 10^{15} M_{\odot}$ にもなった。

## Sgr A\* は確実にブラックホール

この時点で、初めて、Sgr A\*はブラックホール以外ではあり得ない、ということになった。というのは、以前の観測値では、ブラックホール以外の天体、フェルミオンボールでも観測密度を説明することができたのである。ゲンツェルたちの2002年の観測結果によって、フェルミオンボールである可能性は否定され[6]、Sgr A\*はブラックホール以外ではあり得ないことになったのである。Sgr A\*こそ、観測的にもっとも確実にブラックホールであると証明された最初でかつ唯一の天体となった[5]。ゲンツェル、ゲッツ両グループが報告した2002年頃の観測結果、これが今回のノーベル賞の受賞根拠であろうと思う。

## 現在の観測から1：相対論の検証場

その後、両者のグループは現在に至るまで銀河中心の恒星運動観測を延々と継続している。ゲンツェルの観測開始の1992年から既に28年観測が継続されて、もっともSgr A\*に近いS2星はその軌道をほぼ2回公転している。このS2星は近点においてブラックホールから $1,400 R_{\text{S}}$ （Schwarzschild半径）のところに位置する。これほどまでブラックホールの近傍にある質点と見なせる天体は観測的には他に知られていない。そのことを利用すると、一般相対論の実証の実験場として大変有効であり、ニュートン力学からの運動のずれを既に検出している[7]。日本では、すばる望遠鏡を使って西山正吾（宮城教育大）らがS2星の観測を行い、相対論の研究者である斉田浩見（大同大）、高橋真聡（愛知教育大）両氏らと組んで、一般相対性理論の検証観測を進めている。

## 現在の観測から2：ガス雲G2の発見とブラックホールへの落下

ゲンツェルも失敗する。ゲンツェルらのグループは銀河中心の継続観測をするうちに、Sgr A\*に接近する「ガス雲」G2を発見した[8]。本当ならブラックホールへのガス落下によってSgr A\*が明るく輝き、宇宙ジェットが形成されて噴出するかもしれない。ガスが落下する前から観測を行い、その様をつぶさに観測研究できるはずだと言うので、多くの研究者が目の色を変えた。日本では坪井昌人（宇宙研）らが呼びかけて毎日Sgr A\*モニターというVLBI観測が実施された。強度に変化はないか調べるためSgr A\*が南中する前後の1時間だけだが、毎日観測するのである。そしてSgr A\*が輝き出す瞬間を最初に捉えて、世界に通報して貢献しようというのである[9]。また、日本が得意とするsimulationによって、G2ガス雲の変化を予測する斎藤貴之ら[10]の研究など理論研究も進められた。しかしG2ガス雲

の最接近と予測された2013年春を過ぎても、Sgr A\*ではなにも起こらない。G2は本当にガス雲だったのだろうか。筆者を含む結構な人数がゲンツェルの予想に踊らされたわけである\*<sup>3</sup>。

## Sgr A\* のフレア、強度時間変動

彼らの継続観測は、単に銀河中心の恒星運動を知るだけではなく、銀河中心ブラックホールSgr A\*の性質も明らかにしていく。2003年にSgr A\*が近赤外線フレアしている様子をゲンツェルは見つける [11]。以降、Sgr A\*はかなりの頻度で赤外線フレアを起こすことがわかる。それまではSgr A\*は近赤外線では検出できず、直接、恒星との位置比較ができない、とされていた。ほぼ同時期に、X線観測衛星チャンドラの観測からX線でのフレアが検出される [12]。電波でのフレアも同じ頃、見つかる。Sgr A\*は電波では常時観測できるが、センチ波での強度はほとんど変化しないので、発見以来、電波での変動はないものだと思われていた。ところが2000年に宮崎敦史らが野辺山ミリ波干渉計でミリ波帯でのSgr A\*のフレアを観測し [13]、Sgr A\*は短期での強度変動がある天体であることが確立された。なおALMA観測からサブミリ波帯ではもっと短い、Hour以下の時間スケールで変動することも明らかになった [14, 15]。Sgr A\*ではジェットの実在は検証されておらず、これらの電波の強度変化は降着円盤の変動に由来するのであろうか？

## 「我々の天の川銀河の中心にある超大質量コンパクト天体の発見に対して」

さて、ゲンツェル、ゲッツ両氏のノーベル物理学賞受賞理由は“for the discovery of a super-massive compact object at the centre of our galaxy”，訳すと、「我々の天の川銀河の中心にある超大質量コンパクト天体の発見に対して」であ

る。素直に「ブラックホールの観測検証」ではないところが、大変、不思議だ。これには3つの意味があると考えられる。まずは、「実はブラックホールではない」と未来に、万一、示された場合の対策。観測やその解析結果が誤りであることはないだろう。が、新たな物理が見つかって、ブラックホール以外の天体や現象で、この観測事実が説明できるようになるかもしれない。そのような場合でもゲンツェル、ゲッツ両氏の仕事はノーベル賞に値するという含みをもたせるための表現であるのかもしれない。次に、ノーベル委員会はブラックホールやその強重力場の研究はこれからが本番であると考えていて、今回の観測研究の評価に「ブラックホール」という言葉を使いたくなかったのかもしれない。今後あるだろう、ブラックホールやその強重力場での重要な発見は、やはりノーベル賞の対象であるというメッセージかもしれない。そして、非相対論的手法で、相対論の申し子であるブラックホールの確証を得たことが重要だとする現れ。重力波検出に対してもノーベル物理学賞が贈られている。最初の重力波検出はブラックホール同士の合体によるものである。筆者はブラックホール合体からの重力波検出は、同時にブラックホール存在の完璧な確証であると考えている。が、重力波の波形は相対論を使って予測している。つまり、相対論を最初から正しいと仮定して、ブラックホールの存在を証明していることになる。ゲンツェル、ゲッツ両氏の恒星運動の解析は、普通のニュートン力学による天体力学計算であって、相対論は使っていない。非相対論的なブラックホール確証である。この点を非常に重要視して、上記の、ややまどろっこしい受賞理由の文言になっているのだと思う。

\*<sup>3</sup> 何も観測されなかった、という観測結果自体は貴重である。

## 非相対論的ブラックホール探査、 質量密度法

ゲンツェル、ゲッツ両氏は周囲の恒星の運動から、Sgr A\*がブラックホールであることを導いた。これは昔から天文学者にはよく知られた方法によっている。天体の質量は、その周囲の恒星やガスの運動から推定できる。しかし質量からだけでは、ブラックホールであるかどうかはわからない。星の大集団かもしれない。そこでさらに密度を考える。そのブラックホール候補天体を含む宇宙空間の体積、つまり候補天体の体積の上限値を推定する。すると、観測的に候補天体の質量密度の下限値が求まる。その質量密度を物理的に説明しようとして、ブラックホール以外では説明できないような高密度値であれば、ブラックホールであると断定しようというのである。

### 決め手は高分解能の望遠鏡

この“質量密度法”の考えはいたって単純である。しかし、実際の測定精度が悪いと話にはならない。候補天体の質量を正確に量り、候補天体を含む宇宙空間の体積を小さく絞り込み、正確な質量密度を得ることが必要である。観測精度、特に空間分解能の向上が必要だった。20世紀の最後の10年には、ハッブル宇宙望遠鏡や地上の8-10 mクラスの光学赤外線望遠鏡、VLBA（超長基線電波干渉計専用アレイ）が登場し、ブラックホール候補天体のかかなり近傍を高い空間分解能で観測することができるようになった。そのおかげで“質量密度法”がブラックホール探査に非常に有効になったのである。

### ケプラー運動で信頼性を上げる

天文観測では、奥行きを見きわめることが難しい。ブラックホール候補と、それとは無関係の天体が、たまたま我々の視線上で重なり合っていることもある。それを誤認して、候補天体に引かれ

て運動していると考え、間違った質量を求めてしまう。また、たとえ本当に候補天体のそばにいる場合でも、重力以外の原因で運動していることもある。特に観測対象がガスの場合には危ない。活動的な天体が引き起こすジェット現象や超新星爆発などの影響で、ガスが大きな運動速度を得たかもしれない。だから、単に速度が大きいくだけでなく、その運動がケプラー則に従っているかどうかを調べるのが重要になる。それが確認できれば、その天体の運動がまさに中心天体の引力のみに起因していることがわかり、この方法による測定は大変信頼性が高くなる。

その意味では、ゲンツェル、ゲッツ両グループの銀河中心観測よりも、日本発のNGC 4258の観測研究の方が先であった。

### 銀河NGC 4258の巨大ブラックホール

りょうけん座にある銀河NGC 4258 (M 106)は可視光で観測すると、ごく普通に見える渦巻き銀河である。その中心部には1,000 km/sの速度で運動するガスが存在する。

### 銀河NGC 4258の中心核メガメーザ

この銀河の中心部分では、水分子に起因するとても強いメーザ現象（水蒸気メガメーザ）が起きている[16]。メーザはレーザの電波版である。宇宙では、メーザ現象が自然に起きる環境がいくらかもある。宇宙空間に漂う分子ガス雲は、小さくても天文単位の大きさをもっている。星間ガス雲は非常に希薄で、非平衡状態になりやすい。そのためメーザ現象は容易に起き、ガス雲の中で数天文単位に及ぶ長い経路を電波が伝播するうちに増幅され、強い電波となる。生まれたばかりの星や、反対に非常に年老いて星の周囲には、分子ガスの雲が漂っている。メーザのほとんどは、そのような若い星や老いた星に関連する星間分子ガスからのものである。我々の天の川銀河の中だけでもメーザ現象は数千個の天体で観測されている。

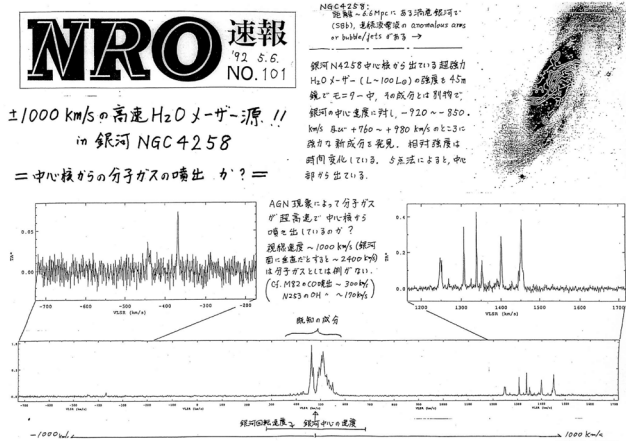


図2 NRO速報 NO.101 '92 5.6.

しかし、銀河NGC 4258のように活動銀河の中心核で起こるメーザは別格の現象だ。数十の銀河で観測されており、大変強力なのでメガメーザと呼ばれている。必ず銀河の中心核で起こっており、中心核の活動性と関係すると発見当初から言われてきた。そのスペクトルは、幅がせいぜい十数MHzの周波数帯（速度の違うガスが複数あるために、ドップラー偏移でスペクトル線の幅が広がる）しかないのに、太陽光度の百倍から数百倍に匹敵する光度をもつ。我々の天の川銀河の中で最も強力なメーザ源は、大規模星生成領域W49Nに付随するもので、その強度は1太陽光度程度である。メガメーザは、それより2桁以上も強力なのである。

### 高速メーザ源の発見

1992年に国立天文台の野辺山45 m電波望遠鏡によって、銀河NGC 4258の水蒸気メガメーザに新しい成分が見つかった。従来知られていた水蒸気メガメーザに比べて1,000 km/sものドップラー偏移をした、高速運動をするメーザ源だ。それも2つあり、従来の速度成分に対し、一方はちょうど1,000 km/s 青方偏移し、もう片方は逆に1,000 km/s 赤方偏移している（図2, NRO速報, のスペクトル参照）。この発見は中井直正氏（関

西大学, 当時, 国立天文台・野辺山) による「銀河のメガメーザをモニターする」という共同観測提案に基づいて行われた。1991年晩秋から野辺山45 m鏡と広帯域分光計AOSを用いてモニターは始まった。ところが、PI中井さんの多忙もあって、実際にデータの解析が行われたのは1992年の5月の連休であった。NGC 4258の観測データに見慣れないスペクトルがあったのである。実は、この発見はオリジナルの共同利用提案とは異なる分光器利用のおかげであった。当時野辺山45 m鏡では世界最大の広帯域分光器があり、分光器を遊ばせておくのは

もったいないと考えた中井さんが、メーザの見つかっていない周波数帯域もすべて記録したのである（中井さんの天文月報記事[17]）。中井さんの手によって即座にNRO速報として連休明けには観測所内に知らされた。この知らせを聞いた森本雅樹は、「1,000 km/sで運動しているなら、すぐさまメーザの動きが固有運動として検出できる。すぐ、鹿島と観測しろ！失敗しないよう2回観測しろ」と激を飛ばした。NGC 4258のメガメーザの示す1,000 km/sという高速度は、何に由来するものであるか？メーザ現象を起こす分子ガスを含んだ円盤が、高速で回転しているのではないか？あるいは天体の両極から分子ガスを高速で噴出しているのではないかと我々は考えた。どちらの場合も、スペクトルに現れたきれいな対称性を説明することができる。いずれであるのか？あるいはまったく想像もできない現象であるのか？それを見きわめるためには、高空間分解能を有する観測が必要である。森本雅樹はそれを早く調べるべきことを示唆したのである。

### KNIFE（鹿島-野辺山干渉計）

鹿島, というのは茨城県鹿嶋市にある研究所, 現総務省NICT鹿嶋のことである。当時はCRL（郵政省・通信総合研究所）と言った。ここには

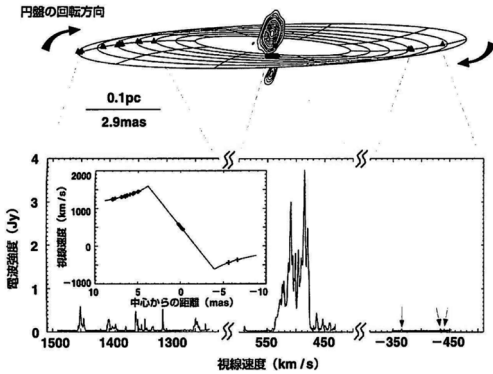


図3 銀河NGC 4258の中心核メーザ。上部は、メーザ源、中心ブラックホール、噴出するジェット的位置関係を示す。メーザはほぼ真横から見るガス円盤雲から放射されており、円盤は時計回りしている。下部の図は、それらのメーザ源の出す電波スペクトル。横軸は視線速度。視線速度は地球に対して遠ざかる場合がプラスである。縦軸は電波の強度である。単位はJy (ジャンスキー、 $1 \times 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ )である。また、はめ込み図はメーザの視線速度と中心ブラックホールの距離の関係を示す。

34 mのアンテナがあって、主に測地VLBI観測を行っていたが、国立天文台とはミリ波VLBIの研究協定を結んでいて、野辺山45 m鏡と結んで43 GHz, 22 GHzのVLBI観測を時折行い、その実験をKNIFE (Kashima-Nobeyama InterFERometer)と呼んでいた。発見から1ヶ月経たない1993年6月初めにKNIFE実験が実施された。ところが観測周波数の計算ミス、まだバグ取りさえ終わっていない相関器 (NAOCO) でのフリッジだし、泥縄で作った撮像解析ソフトの使用などのため、撮像するには至らなかった。しかし、8月には1,000 km/sの高速成分も主成分のメーザと50 mas以内に位置することがわかった。この結果も含めて、NGC 4258の高速メガメーザの検出

は論文投稿され、1993年1月初めに論文掲載された [18].

## VLBA

その発見を聞き及んだ米・ハーバード大のモラン (J.M. Moran) はVLBAによる観測を共同で行おうと我々に提案してきた。彼はVLBIによる観測の大家であり、野辺山での発見に非常に興味をもっていた。VLBAは米国のVLBI観測専用の10台の口径25 mの電波望遠鏡のことである。全体で1つの巨大電波望遠鏡として稼働している。このシステムをVLBA (VLBI Array) と呼ぶ。東はカリブ海のセントクロイクス局から西はハワイのマウナケア局まで、差しわたし8,000 kmにも及ぶ。達成できる空間分解能は、フリッジ間隔 ( $\lambda/D$ , 観測波長/口径) で周波数22 GHz (観測された水蒸気メーザの周波数) において0.3 masにもなる。つまり、VLBAは口径8,000 kmの電波望遠鏡なのである。ハワイの「すばる」望遠鏡 (口径8 m) に比べ6桁、100万倍も大きな口径をもっているため、観測波長が4桁大きくても、空間分解能では2桁よいことになる。このVLBAは1994年に観測を開始するのであるが、早々にNGC 4258の観測が行われ、銀河NGC 4258の水蒸気メガメーザの謎が明らかになった\*4。

## ケプラー運動するガス雲

VLBAによる観測の結果、銀河NGC 4258の水蒸気メガメーザは巨大ブラックホールを取り巻く、高速回転する分子ガス円盤からのものであることがわかった [19]. その円盤の半径4.1 mas (実半径0.13 pc) から半径8 mas (実半径0.25 pc) の範囲に、メーザ源が分布している。個々

\*4 と、簡単に書いたが、観測開始は装置が完全に稼働することは意味しない。特に相関器の立ち上げバグ出しの段階で、処理データにはおかしなデータが相当数混ざっていた。また、解析ソフトであるVLBA用AIPSも不完全であり、我々が解析をしながら、そのバグを見つけ NRAO に報告して、バグを修正して解析を進める、という有様であった。この作業では当時ハーバードの大学院生であったヘルンシュタイン (Herrnstein) が一番苦労した。彼はこのNGC 4258のVLBA継続観測で学位を得た。

のメーザ源はスポット状に見える(図3)。我々はその高速回転する分子ガス円盤をほぼ真横から見ている。そのため円盤が回転し、我々に向かってくる部分からのメーザ放射(図中、右側、▲印で表した、視線速度は $-350$  km/sから $-450$  km/s)はドップラー効果により青方偏移し、遠ざかる部分からのメーザ放射(図中、左側、▲印で表した。視線速度は $+1,200$  km/sから $+1,450$  km/s)は赤方偏移して観測される。おそらく円盤全体で水蒸気メーザ現象は起きているのだが、メーザ電波の指向性のため、我々は一部をいくつかの輝点として観測することになる。また、円盤のうちで我々に一番近い手前の部分からのメーザ放射(図中の●印)は、視線速度で $470$ – $540$  km/sであるが、回転の速度ベクトルが我々の視線と直交するため、円盤の回転によるドップラー偏移は受けず、銀河NGC 4258の後退速度とほぼ等しい視線速度( $470$  km/s)を示している。中心の■印のところが回転円盤の中心だが、ここに巨大ブラックホールがある。そこから上下にジェットが噴出しているのも観測された(等高線で示した部分)。さらに個々のメーザスポットの視線速度と円盤の中心からの距離の関係を調べると、中心からの距離が離れていくに従って、メーザの示す視線速度は中心部分にあるメーザの視線速度との差が小さくなっていくことがわかる(図3下の囲みの図)。これは、円盤の外側にいくほど円盤の回転速度が遅くなっていることを示している。この速度の変化は、ケプラー運動で回転している場合(公転速度が中心からの距離 $R$ の $-0.5$ 乗に比例する)と、4%程度の誤差で一致していることがわかった。右肩下がりの直線は、剛体回転を示しているのではない。これは円盤の回転速度ベクトルが視線に対して垂直であった状態から傾きを変えた場合の、視線方向に投影される速度成分を示す。ケプラー運動を示す曲線とこの直線は $\pm 3.8$  masのところで交差する。このことから、中心部分のメーザ現象(●印)が中心から(奥行き!)半径

$3.8$  masの部分で起きていることがわかる。さて、中心天体の質量は $3.6 \times 10^7 M_{\odot}$ と推定された。この質量は、もっとも内側にあるメーザスポット(半径 $0.13$  pc)より内側に存在するわけであるから、半径 $0.13$  pcの球の体積でこの質量を割って密度を計算すると、 $1$  pc<sup>3</sup>あたり $4 \times 10^9 M_{\odot}$ になる計算だ。このように高密度で天体が長期間安定して存在する天体が、ブラックホール以外だとはとても考えにくい。たとえば、恒星が密集している天体として、球状星団があるが、その密度は $10^5 M_{\odot}/\text{pc}^3$ 以下である。もしこの中心天体が太陽程度の質量の星が密集した星団だとすると、恒星間の平均間隔は $100$ 天文単位しかないことになる。すぐさま恒星同士が衝突し、1億年くらいで星団は崩壊してしまう。ありとあらゆる物理的可能性を考慮すると、ブラックホールではなく、フェルミオンボール—ニュートリノでできた天体、それらしいものは一度も観測されていない—といった可能性もまだあった。が、「25年間、待ち望んだブラックホール存在の確証観測をありがとう」、と1969年に銀河中心ブラックホールの存在を予言したLynden-Bell [20]が研究チームに祝辞を贈ってくるほどのインパクトだった。1,000 km/sもの速度で円盤が回転するなら、回転していく様子が中央部分に位置するメーザスポットの固有運動(我々の視線に対し垂直方向の天体の位置変化、つまり天球面上での運動)となって見えるはずである。左右のメーザスポットは回転円盤が我々の視線に平行に運動している部分に乗っているため、固有運動は現れない。一方、中心に見えるメーザは円盤が我々の視線に対して直交する方向に動いている部分に乗っているから、固有運動が観測できるはずである。その検出のため、その後3年間にわたってVLBAで継続観測が行われた。予測どおり年間約 $31.5 \pm 1$ マイクロ秒角の固有運動が検出され、回転円盤の詳細はさらに確かになった。メーザスポットの固有運動を含めて中心質量はさらに正確に $(3.9 \pm 0.1) \times 10^7 M_{\odot}$ と求



められた [21].

銀河 NGC 4258 の水蒸気メガメーザにおいては、円運動に起因する加速度の測定まで行われている。中央部分のメーザは、円盤のうち、我々の視線に対し直交する方向に運動する部分に乗っていると先に言ったが、これらは正確には直交するのは一瞬であり、その前後では視線に対してなす角度が少しずつ変わっていく。そのため、中心部分のメーザの示す視線速度は時間変化していく。速度の時間変化とは、つまり加速度である。電波望遠鏡でスペクトルの変化を追っていくことで、円運動の加速度  $\alpha$  (=約 9.5 km/s/year) がわかる。

実半径  $r$ 、回転速度  $v$  とすると、 $\alpha = v^2/r$  であるから  $\alpha$  と  $v$  から  $r$  (実半径) が計算できる。すると、VLBA で得た見かけの半径との比較から、銀河 NGC 4258 までの距離  $D$  を求めることができる。見かけ 4.1 mas に見える半径  $r$  での速度  $v = 1,080$  km/s、 $\alpha = 9.5$  km/s/year を用いると、実半径  $r$  は  $3.87 \times 10^{12}$  km = 0.126 pc、距離  $D$  は約 6.4 Mpc となる。実際には観測されるメーザスポットの空間分布とその固有運動、さらに加速度を用い、ケプラー円盤モデルの最適パラメータを探すというところを行う。その結果、銀河 NGC 4258 の距離は  $7.2 \pm$

0.3 Mpc となる。ケプラー運動する円盤、ということだけを利用して得た距離の測定結果は、従来の距離測定法を較正する新しくて独立の手段を提供している。

ほかの銀河の水蒸気メガメーザも、ケプラー回転する円盤から出ているのではないかと VLBA を使っていくつかの観測が行われた。水蒸気メーザの発信源は星間ガスである。最初に述べたように、星間ガスの運動は重力によるとは限らない。そのためか、ほかの銀河の水蒸気メガメーザでは、NGC 4258 のように見事なケプラー回転する円盤に由来することが明確なものも残念ながら見つかっていない。(また、水蒸気メガメーザよりも内側の分子ガス円盤部分で SiO メーザが放射されているのではないかと、あれば、NGC 4258 のブラックホールにもっと、迫ることができる！と考え、野辺山 45 m 鏡による観測を 1997 年頃中井らが行った。が、残念ながら検出されなかった。)

## ハッブル望遠鏡の貢献

ゲンツェル、ゲッツ両氏の観測は近赤外線、NGC 4258 の観測は電波の観測結果であった。しかし、巨大ブラックホールを検出するのに、電波

表1 本記事で述べたブラックホール観測.

発表年	事柄	測定質量・密度
1969	Lynden-Bell, 銀河中心核に大質量ブラックホールの存在を予言 [20]	
1971	小田稔ら, Cyg X1 の X 線変動観測からブラックホールではないかと言及 [2]	
1974	Balick ら, 天の川銀河中心に点状電波源として Sgr A* を発見 [1]	
1993	中井直正ら, 野辺山 45 m 鏡によって NGC 4258 の高速度水メーザを発見 [18]	
1994	Ford ら, HST による M87 の中心核ブラックホールの測定 [22]	$(2.4 \pm 0.7) \times 10^9 M_{\odot}$ , $1.0 \times 10^5 M_{\odot}/\text{pc}^3$
1995	三好真ら, VLBA 観測から NGC 4258 の中心核ブラックホールの測定 [19]	$3.6 \times 10^7 M_{\odot}$ , $3.9 \times 10^9 M_{\odot}/\text{pc}^3$
1996	Eckart ら, 銀河中心星の赤外線観測から Sgr A* を測定 [3]	$(2.45 \pm 0.4) \times 10^6 M_{\odot}$ , $6.5 \times 10^9 M_{\odot}/\text{pc}^3$
1997	Herrnstein ら, VLBA 継続観測から NGC 4258 の中心核ブラックホールの測定, さらに距離の精密測定 [21]	$(3.9 \pm 0.1) \times 10^7 M_{\odot}$ , $2.27 \times 10^9 M_{\odot}/\text{pc}^3$
2000	Ghez ら, 独立の銀河中心星の赤外線観測から Sgr A* を精密測定 [4]	$(2.3 - 3.3) \times 10^6 M_{\odot}$ , $(19.2 - 6.86) \times 10^{13} M_{\odot}/\text{pc}^3$
2002	Schödel ら, 銀河中心星の赤外線観測から Sgr A* を測定 [6]	$(3.7 \pm 1.5) \times 10^6 M_{\odot}$ , $4.1 \times 10^{15} M_{\odot}/\text{pc}^3$

や赤外線観測が特別有利であるというわけではない。我々の天の川銀河中心, Sgr A\* の場合にも, 星間ダストによる可視光の吸収という問題さえなければ, 巨大ブラックホールの存在は早々と明らかになっていたはずである。また, どの銀河中心核にもメガメーザ源があるというわけではないので, 巨大ブラックホールを見つけ, 質量を量る際に VLBI が常に役立つわけでもない。銀河の中心核にある巨大ブラックホール候補の質量を数多く測定しているのは, 実のところ, ハッブル宇宙望遠鏡などの可視光観測である。ブラックホール候補天体のそばの天体のケプラー運動を確認するには, ハッブル望遠鏡の空間分解能では足りない。そのため, 上記に示した2例に比べると精度は高くない。しかし, 銀河 M87 の中心核巨大ブラックホールの質量の測定をはじめとして [22], 数十の銀河の巨大ブラックホール質量を測定している。数の功績は偉大である。ハッブル望遠鏡による巨大ブラックホールの質量測定のおかげで, 巨大ブラックホール質量とその銀河のバルジ成分の質量や内部速度分散との相関が, 統計的に明らかになっている。

## 今後の期待

先にも述べたが, ノーベル委員会はブラックホールやその強重力場の研究はこれからが本番であると考えていると思う。今後あるだろう, ブラックホールやその強重力場での重要な発見が楽しみである。なお, ブラックホール存在確証に至る複数の観測を述べたが, それらを年表にした(表1)。

## 謝辞

「日本での関連研究についても述べよ」という天文月報編集部の意向に沿って本記事は執筆させていただいた。2019-2020年度天文月報編集委員の方々は大変お世話になりました。ここでお礼を申し上げます。ごく最近の研究については西山

正吾氏に情報をいただきました。

## 参考文献

- [1] Balick, B., & Brown, R. L., 1974, ApJ, 194, 265
- [2] Oda, M., et al., 1971, ApJ, 166, L1
- [3] Eckart, A., & Genzel, R., 1996, Nature, 383, 415
- [4] Ghez, A. M., et al., 2000, Nature, 407, 349
- [5] Schödel, R., et al., 2002, Nature, 419, 694
- [6] Munyaneza, F., & Viollier, R. D., 2002, ApJ, 564, 274
- [7] Abuter, R., et al., 2018, A&A, 618, L10
- [8] Gillessen, S., et al., 2012, Nature, 481, 51
- [9] Tsuboi, M., et al., 2015, ApJ, 798, L6
- [10] Saitoh, T. R., et al., 2014, PASJ, 66, 1
- [11] Genzel, R., et al., 2003, Nature, 425, 934
- [12] Baganoff, F. K., et al., 2001, Nature, 413, 45
- [13] Miyazaki, A., et al., 2004, ApJ, 611, L97
- [14] Iwata, Y., et al., 2020, ApJ, 892, L30
- [15] Miyoshi, M., et al., 2019, GCWS-2019, New Horizons in Galactic Center Astron. and Beyond
- [16] Claussen, M. J., et al., 1984, Nature, 310, 298
- [17] 中井直正, 1995, 天文月報, 88, 285
- [18] Nakai, N., et al., 1993, Nature, 361, 45
- [19] Miyoshi, M., et al., 1995, Nature, 373, 127
- [20] Lynden-Bell, D., 1969, Nature, 223, 690
- [21] Herrnstein, J. R., et al., 1999, Nature, 400, 539
- [22] Ford, H. C., et al., 1994, ApJ, 435, L27

## 2020 Nobel Prize in Physics, the Discovery of a Supermassive Compact Object at the Centre of Our Galaxy

**Makoto MIYOSHI**

*National Astronomical Observatory of Japan,  
JASMINE Project, 2-21-1 Osawa, Mitaka,  
Tokyo 181- 8588, Japan*

Abstract: Contrary to most expectations that the 2020 Nobel Prize in Physics would be related to physical properties, it was about astronomy following 2019. Of the three winners, R. Genzel (Germany) and A. M. Ghez (USA) were awarded “for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy.” In other words, “for finding a black hole.” I will explain their works. Also remarkable Japanese researches on this issue like Nobeyama observations of NGC 4258 are described.