

水メーザーによる銀河中心核の ブラックホールの検出と距離の直接測定

中井直正

〈国立天文台野辺山 〒384-13 長野県南佐久郡南牧村野辺山〉

りょうけん座にある系外銀河 M 106 (NGC 4258) の中心に、太陽の 3600 万倍の重さのブラックホールが見つかった。これは、そのまわりにケプラー回転しているガス円盤から出ている水メーザーを電波望遠鏡で観測して見つかったものだ。同時にこれから、銀河までの距離を直接、正確に求める新しい方法も見つかった。この結果は、銀河中心核の活動性や宇宙の構造を調べる強力な手段を見いだしたことになり、この方面の研究に新たな展開をもたらすものと期待される。

栄光をつかんだ大先生と、つかみそこねた ポストドク

星間空間での分子発見ラッシュの黎明期である 1960 年代末頃、同じ観測を意図しながらその後の天文学に名を残すことになったグループと、その栄光をつかみそこねたグループがいた。後者は大学院を出てまもない若いポストドクの二人である。彼らは星間空間で水（気体なので水蒸気と呼ぶ方が適切だが）を検出しようとして、アメリカ国立電波天文台の共同利用の電波望遠鏡に観測を申し込んだ。ところが、その申込みを審査した委員会は、たとえ水が存在したとしてもその電波は非常に弱いはずで受かるわけがない、観測時間の無駄使いである、と拒否してしまった。当時としてはその決定は理にかなったものであった。メーザーを起こしているとは考えるよしもなし。

一方、栄光を手にした前者とは、自ら実験室でコヒーレント光であるレーザーやメーザーを発明し、少し前にノーベル賞をもらっていたチャールズ・タウンズ大先生のグループであった。彼らもまた、星間空間の水からの電波は非常に弱いだろうと思っていた。しかし、彼らは自由に使える自分達の望遠鏡を持っていて、少し前に、波長 1.27 センチメートルのアンモニアのスペクトルを発見

していた。水スペクトルの波長は 1.35 センチメートルである。波長が近いので同じ装置で観測できる。無駄かもしれないが、観測してみよう。そう思った大先生は、しかし、あまり期待していなかったので、大学院生のアルに観測を命じて、自分はグループのメンバーを自宅に招待してクリスマス・パーティーを開いていた。パーティーに出られない、かわいそうなアルは夜ひとりでシコシコと観測していた。いくつかの分子雲を観測していたが、望遠鏡をオリオン星雲に向けたとき突然とんでもなく強いスペクトルが飛び込んできた。びっくりしたアルは大先生の家で電話をかけて叫んだ、「オリオンで雨が降っている！」さらに電離領域の W 49 を観測すると、もっとすごいスペクトルが現れた。宇宙空間の電波スペクトル線で最強の水 (H₂O) メーザーの発見である。1968 年も末のことであった。なお、不運なポストドク 2 人はめげずに後に、ホルムアルデヒドという、これまた星間空間では特異な分子を発見している。この話は、望遠鏡の共同利用をやるものにとって、考えさせられるものである。

百万倍の超強力水メーザー

水メーザーは我々の銀河系では、OB 型星による電離領域に付随した分子雲や、晩期型星（赤色

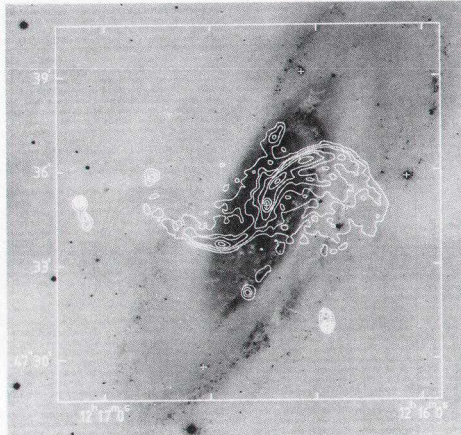


図1 M106 (NGC4258) の光の写真と、中心から出ている電波ジェット (等強度線)

巨星, 超巨星) 周囲のガスから出ている。特に前者からのメーザーは強力である。銀河系で見つかったものを, 系外銀河でも探し始めるのは常套手段である。銀河系との類推から, 電離領域やスターバースト銀河を選んで探査がなされた。しかし, その過程でまた予想もしないものが見つかった。オリオン電離領域の数百万倍から数千万倍もの光度のメーザーを出している, とんでもない銀河5個である。さらに驚くことに, すべて, セイファートまたはライナーと呼ばれる活動的中心核を持つ銀河であり, 電波または光で大きなジェットを持つ。しかも, この超強力水メーザーはまさにその中心核から出ている。星形成ではなく, 銀河中心核の活動性に関係があるらしい。M 106 は, そのうちの1つであった¹⁾ (図1)。

誤りの論文から, 毎秒±1000 キロメートルの高速度水メーザーの発見へ

1990年5月, M 106 からの超強力水メーザーの強度が, 85日周期で変化しているという論文が発表された。これは, 4年後に同じ著者自身で否定されることになる誤りの論文だったが, そんな論文が思わぬ貢献をしてしまった。この報告を信じ込んでしまった著者は, 他の銀河でも調べるため

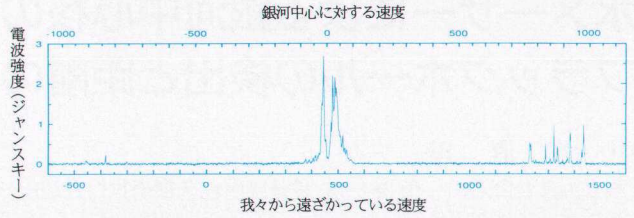


図2 M106の中心から出ている超強力水メーザー²⁾。下の横軸が我々から遠ざかっている速度, 上の横軸がM106の中心に対する速度。中央付近に見えるのが1984年に見つかった主成分で¹⁾, ±1000キロメートル近くにあるのが新たに見つかった高速度成分。

に, M 106 の確認も含めて, いくつかの銀河の既知の水メーザーの時間変化の測定を国立天文台45メートル電波望遠鏡の共同利用観測に申し込んだ。このとき, M 106 の確認という, つまらない内容を入れておかなければ, この原稿を書くこともなかった。

観測は, 1991年12月から約半年間の予定で行なわれた。45メートル鏡の1台の分光計は540キロメートル毎秒の速度範囲を観測できる。観測提案書に書いた目的にはそれで充分であった。しかし45メートル鏡は他の電波望遠鏡と違って, 分光計を8台持っている。遊ばせておくのはもったいない。もしかしたら, メーザーはその540キロメートル毎秒の少しぐらい外側には出ているかもしれない。それでその両隣の速度のところには1台ずつ並べた(結果としてここには何もできなかった)。それ以上外側の速度は観測しても無意味だろう。しかしまだ分光計が余っている。それで, 仕方なしに残りの分光計をさらに離れた速度のところにも並べた。これは観測提案書の内容から逸脱した行為である。しかし結果として, その分光計のところに予期しないものが受かった。あまりに予想外のことなので, 観測家としてはずかしいことに, それに3カ月も気がつかなかった。4番目に観測したM 106は長い間真ん中の分光計以外は見なかったのである。のちに全データを解析しはじめて初めて, 毎秒±1000キロメートル近くのところ

に別のスペクトルが出ていることに気がついた(図2)。一目見てレーザーだと思った。しかしその速度があまりに大きい。もし本当だったら大変なことだが、しかしもし何かの間違いだったら大恥をかく。そこで誰にも言わずに望遠鏡等をいろいろチェックし、最終的にそれがその銀河の中心から出ている水レーザーだと確信するまでには時間を要した。M 106の水レーザーは、過去8年間に数十回観測されていたが、高速度成分は初めて日の目をみることになった。その理由は、45メートル鏡が他にない装置を持っていたからである(これを用意されていた大先輩達には感謝)。しかし、それにしても毎秒±1000キロメートルという速度は、これまでに観測された分子ガスのどんな速度よりも数倍以上大きい。正体はいったい何なのか?

大質量ブラックホールのまわりの回転円盤

ともあれ、その変な結果を論文にして雑誌に送った²⁾。投稿するとレフリーという人が論文の妥当性を審査することになっている。そのうちのひ

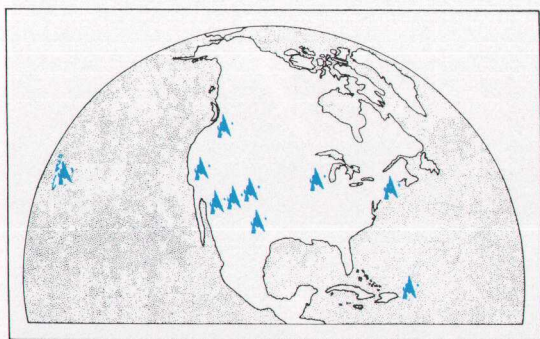


図3 超長基線アレイ(VLBA)。口径25メートルのアンテナ10台をアメリカ本土とハワイ、プエルトリコに配置し、東西約8000キロメートル、南北約4000キロメートルの大電波干渉計をなす。水レーザーの周波数22ギガヘルツでは、角分解能は東西に約1万分の3秒角、南北に約1万分の6秒角。

とり曰く、「この論文を見た天文家は自分の望遠鏡のところまで走っていきましょう」。実際、アメリカとドイツの電波望遠鏡がすぐに確認に走り、光やX線の望遠鏡でも観測が始まった。かくして、この高速度水レーザーの正体を明らかにするべく激的な競争が世界中で始まった。ましてや、その電波強度は徐々に弱くなっているのである。当然筆者達のグループもその解明に向けて別の観測を行った。使ったのは、アメリカの超長基線アレイ(VLBA)という電波干渉計である(図3)。

この観測により図2の個々のレーザー成分の位置が図4cのように決定された³⁾。ほぼ東西に並んでいる。それに沿ってひとつひとつのレーザーの速度を書くと図4bのようになる(図2と比較するとよい)。これの意味しているところは図4aのように、レーザーを起こしている水分子は回転している円盤の中にあり、我々はその円盤をおおむね横から見ているということになる(図5)。図2の高速度成分は回転によるドップラーシフトであった。円盤はコンパクトで(内半径が0.13パーセク、外半径が0.25パーセク)、薄い(厚さは直径の1/100以下)。円盤の回転軸はおおむね南北の方向にあり、銀河全体の回転軸とは90度以上異なっているが、図1の電波ジェットの本元付近の方向とは合っている。つまり、この回転円盤に垂直な方向にジェットが出ている。

円盤の回転速度は内側で毎秒1080キロメートル、外側で毎秒770キロメートルであり、とてもきれいなケプラー運動をしている(図4b)。この正確な回転速度と円盤の半径から、内側に存在する物体の質量が太陽の3600万倍であることがわかる。もしこれが、たとえば太陽のような通常の星の集団だとすると、星と星の間隔は太陽系の直径程度となり、4000万年以下で互いに衝突して、たぶんバラバラになって破壊されてしまうだろう。この年数は銀河の年齢(100億年程度か)に比べればはるかに小さいので、このような星の集団は存在しえないと考えられる。従って残る可能性は、

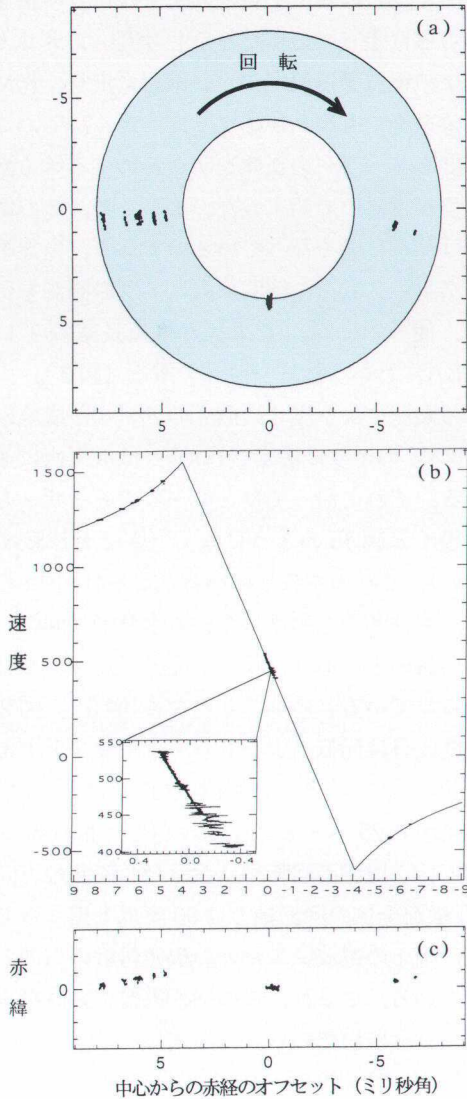


図4 (a)回転する分子ガス円盤を上から見た図³⁾。横軸、縦軸のスケールの単位はミリ秒角(1000分の1秒角)。点が水メーザーの位置。ガス円盤の内半径は4.1ミリ秒角(0.13パーセク)、外半径は8.0ミリ秒角(0.25パーセク)。この中心に大質量ブラックホールがある。我々はこの円盤を下から見ていることになる。
 (b)円盤を横から観測したときの速度場。左右に見える高速度成分は、外側へ行くほど、中心からの距離の1/2乗に反比例して速度が減少しているの、円盤はケプラー回転している。
 (c)天空上における観測された水メーザーの位置。おおむね東西に並んでいるので、図aの円盤を横から見ていることになる。完全な1直線上に並んでいないのは、この円盤が我々に対し真横から7度程度傾いていることと(図6)、外側へ行くにしたがって、少しずつ傾きが変わるから(図5)。

ブラックホールということになる。

水メーザーが円盤全体ではなく、図4aのような限られた特定の領域にしか存在しない理由は少しややこしい。メーザーに特有な現象に起因しているからである。たぶん中心付近に強い輻射源(たとえば強い連続波電波)があって、それが円盤中にある水分子を励起し、反対側(つまり外側)に強いメーザーを放出していると考えられる(ビーミング)。ところが、円盤は観測者から見て少し傾

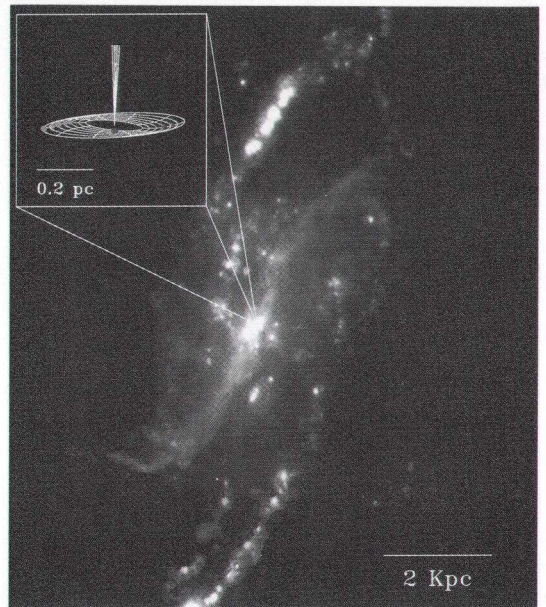


図5 M106内側の光の写真と、中心にある回転分子ガス円盤の模式図³⁾。

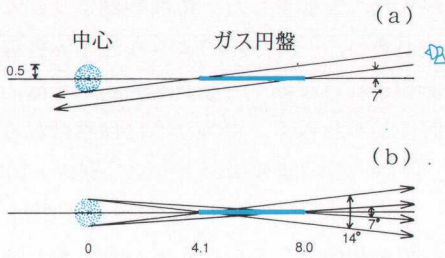


図6 (a) M106の中心と回転円盤の断面図。円盤は我々の視線に対し7度程度傾いているので、円盤の内側の縁だけが、中心付近からの強い輻射場によってメーザーを出しているように見える。その外側では背景に輻射場がないので、我々からはメーザーが観測されない(図4a)。(b) M106の水メーザーは約14度の角度の範囲しか、メーザーを出していない(ビーミング)。円盤を上から見ると、メーザーは観測されないだろう。横のスケールはミリ秒角。

いているので、主成分は円盤の内側でしか見られない(図6a)。高速度成分が横にならんで見えるのはなぜか。メーザー源は中心付近からの強い輻射を背中から受けると前方にメーザーを出す、横方向にもちょっとは出すであろう(アンテナのサイドローブのようなもの)。横方向に出た弱いメーザーはとなりの水分子を刺激してさらにメーザーを引き起こすので少し強く出る。それがまたとなりの水分子を刺激してさらに強いメーザーを起し、カスケード的にどんどん強くなって観測されるようになると推定される。しかし、そのためには、となりの水分子と速度がほとんど同じでなければならない。速度が大きく異なると水分子の周波数がずれるからである。回転している円盤を横から見た場合、速度がほぼ同じところは、図4aで見られるように視線に垂直な方向である。従ってそこから出てくるメーザーはよく観測されて、それ以外のところから出ているメーザーは我々には見えないのである。

銀河の距離を直接測定する新しい手法

毎秒±1000キロメートルの高速水メーザー発見の論文を見て、あわてふためいたグループがア

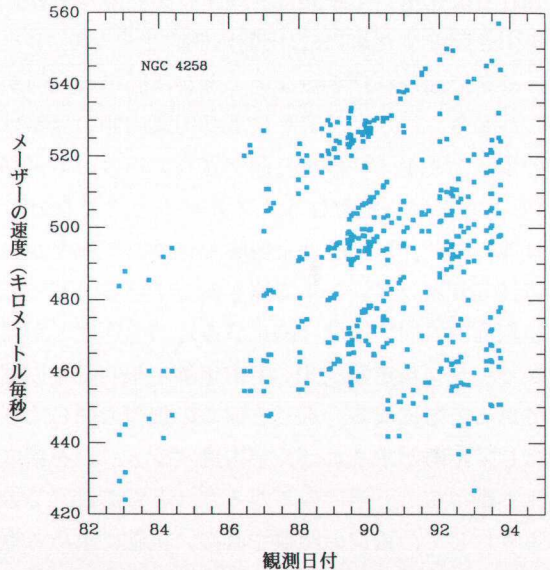


図7 図2の水メーザーのうち、中央付近にある主成分の各ピークの速度の時間変化⁴⁾。1年間に9.5キロメートル毎秒ずつ、系統的にシフトしている。これは、図4(a)の円盤中にあるメーザー源の速度ベクトルの、観測者の視線方向への成分が、回転とともに変わるからである。観測される高速度成分の速度はほとんど変わらない。

メリカに少なくとも2つあった。1つは、10年前にM106の水メーザーの主成分(低速度成分)をVLBIで観測していたが、ほったらかしにしていたグループである。あわてて解析して主成分について図4b, cと同じ結果を得た。

もう1つのグループは⁴⁾、1982年からその主成分の時間変化をモニターしていて、各メーザー成分の速度が規則正しく変化しているという驚くべき事実(図7)を得ていた。しかしその理由がわからなかったので、10年間ただひたすらモニターするのみで、論文にはしていなかった。図4を見れば、この理由は明らかである。円盤の回転ともなって、メーザーの速度ベクトルの我々の方向への成分が変化するからである。従って、分子ガス円盤の内側の回転速度(毎秒1080キロメートル)が、主成分の視線方向の速度ベクトルの観測

される変化量（1年間に9.5キロメートル毎秒）を引き起こすためには、円盤内側の半径が0.13パーセクでなければならないことが、簡単な幾何からわかる。一方、VLBAにより円盤内側の見かけの半径が4.1ミリ秒角と測定されているので（図4a）、両者から距離は6.4メガパーセクでなければならない。M106は宇宙膨張に乗って我々から毎秒520キロメートルで遠ざかっている（おとめ座銀河団方向の速度は補正済み）。この速度と距離からハッブル定数が81、宇宙年齢が120億年以下であることになる。もっと遠くの銀河で同じようにして距離が求まれば、宇宙論パラメータを精度よく調べることができるだろう。ともあれ、このようにして、銀河の距離を直接、正確に求める全く新しい方法が見い出された。ニュートンの万有引力の法則さえ知っていればよいのである。メーザーの観測を始めたときには想像もしていなかった副産物。

銀河と宇宙の新しい研究手段

一旦突破口が開かれると、その新しい領域が急速に発展するのは、どの分野でも同じである。今や、45メートル鏡を含む世界中の電波望遠鏡で、2匹目、3匹目の「どじょう」をねらって、激的な競争が展開されている。ただ、問題なのは、図6bのようにメーザーは狭い角度にビーミングしているようなので、そのビームがたまたま地球の方を向いていないと観測できない。だから数多く観測する必要がある。今後の観測によってこのような銀河がたくさん見つかってくると、銀河中心核の活動性や宇宙構造の解明に新しい展開をもたらすものと期待される。

編集委員の方には、日米共同研究やマスコミについての記述も要請されていたのですが、字数の制限で割愛したり、意図的に省いたりしました。ただ、蛇足で付け加えるならば、この内容を記者会見で発表したとき、多くの記者から、図5のうち回転円盤の図を除いた、光学写真だけが欲しい

とせがまれ、驚きました。電波観測よりはるかに画素数の多い、「すばる」のような光学赤外線望遠鏡によるきれいなカラー写真を発表すれば、内容の如何にかかわらず、マスコミには喜ばれるでしょう。「ハッブル」望遠鏡のように、毎秒±1000キロメートルの水メーザーが見つかった段階で、これまで誰も想像もしていなかった全く新しい天体や物理現象が現れることを期待したのですが、結果が、むかしから理論的に予言され、言葉がちまたにもあふれているブラックホール周囲の回転円盤に落ちついて、いささかがっかりしています。しかし、いろいろな意味で教訓となる研究でした。

参考文献

- 1) Claussen M. J., Heiligman G. M., Lo K. Y., 1984, Nature 310, 298
- 2) Nakai N., Inoue M., Miyoshi M., 1993, Nature 361, 45
- 3) Miyoshi M., Moran J., Herrnstein J., Greenhill L., Nakai N., Diamond P., Inoue M., 1995, Nature 373, 127
- 4) Hashick A. D., Baan W. A., Peng E. W., 1994, ApJ 437, L35

Detection of a blackhole in an AGN and a new method of measuring galaxy distances using a water vapor maser

A massive blackhole and a molecular disk rotating around it were discovered in the active nuclei of M106 (NGC 4258) by observing powerful H₂O maser emission. In addition, the rotating disk provides a new method of directly measuring the distances of galaxies which would reveal the structure of the universe.