

祝・日本学士院賞受賞

「果報は寝て待て」の意味するところ

中 井 直 正

〈筑波大学大学院数理物質科学研究科 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1〉

e-mail: nakai@physics.px.tsukuba.ac.jp

自然科学の特に実験や観測的な研究における予想外の発見はほとんどが偶然から生まれる。水メーザーの観測による活動銀河中心核と巨大質量ブラックホールの研究もそのような幸運から生まれた。

銀河中心の超強力水メーザー

私が大学院生だった頃に五つの銀河の中心に銀河系には存在しない超強力な水メーザー（レーザーと同じ原理でマイクロ波帯で発振する誘導放射）が欧米で発見された（1979-1985）。等方的な放射を仮定すると、たった1本のスペクトル線で太陽が電波からX線まで放射する全光度の百倍に達し、通常の大質量星形成領域から放射される水メーザーの百万倍にも達するのでメガメーザーとも呼ばれた。しかもそのメーザーは不思議なことにすべて銀河中心から出ていた。また銀河のいくつかはセイファートに分類されたり、中心からジェットを出していたりして活動銀河中心核の兆候を示していた（現在ではほとんどが2型セイファートかLINERに分類される）。

このようにたいへん不思議なメーザーは世界的に注目されたけれども、その発生原因を調べる方策がなかった。VLBI（超長基線電波干渉法）で観測してもその構造を分解することができなかった。そのような暗黒時代が10年近く続いた。

発見は偶然から

1990年に米国のグループが上記の銀河の一つ

であるNGC 4258（図1）の水メーザーの強度が85日周期で周期的な変動をしているという論文を発表したり、この結果は4年後に同じ著者たちによって否定されることになる「誤りの論文」であったが、それを知るよしもない私はこの結果にたいへん興味をもち、他の銀河の水メーザーでも周期的な強度変化がないかどうかを調べるために野辺山45メートル電波望遠鏡の共同利用に観測

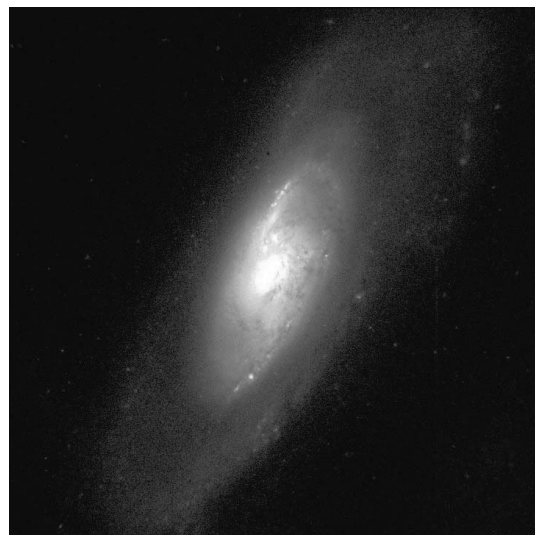


図1 渦巻銀河 NGC 4258 の光学写真（米国天文学会）

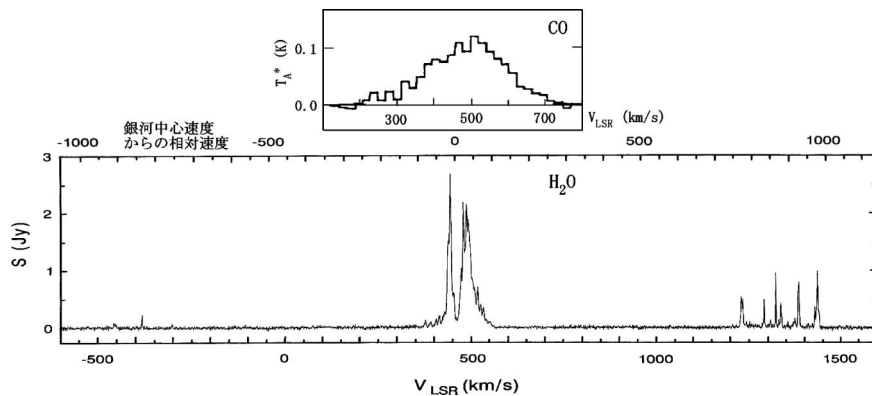


図2 LINERであるNGC 4258に見つかった水メーザー（気体の水分子が出すので水蒸気メーザーというほうが適切かもしれない）のスペクトル²⁾。横軸が後退速度（銀河がわれわれから遠ざかる速度）で縦軸が電波の強さ。上の目盛りは銀河中心速度に対する相対速度。上の図は同銀河の一酸化炭素COのスペクトル。

プロポーザルを提出した。目的は「他の」銀河であったが、「ついでに」NGC 4258の結果を確認するためにその銀河も観測対象に入れておいた。

観測は認められ、1991年12月から始まった。観測の前日に周波数設定を考えたが、銀河中心速度付近にある目的の水メーザーを観測するだけならば速度範囲が毎秒540キロメートルをカバーできる電波分光計を1台使えば十分であった。しかし45メートル鏡には星間分子探査用に用意された世界でここにしかない8台の分光計があった。これを遊ばせておくのは「もったいない」。まれに一酸化炭素COの観測で見られるように多少は高速度成分があるかもしれない。そこで中心速度の分光計の両隣の速度のところにそれぞれ1台ずつを配置した（結果としてそこには何も受からなかった）。それでもまだ「余って」いる。そこで1台を中心速度成分のバックアップとして使用し、残り全部の分光計をさらに外側の速度のところに配置した。特に深い理由はない。何か受かるとは考えていなかったが、準備としてはそれが最も簡単だったのである。これは観測プロポーザルには「記述されていない逸脱行為」であった。

観測が始まり、最初の2,3の銀河のときには観測中に全分光計のスペクトルをチェックした。

しかし既知の水メーザー成分以外は何も受かっていなかった。当然である。そこで4番目に観測したNGC 4258ではもう中心速度成分の分光計以外は見なかった。

観測目的は既知のスペクトル線の強度モニターであったので、観測はおよそ7-10日間隔で約半年間割り当ててあった。観測開始から約3カ月(!)もたって、やっとNGC 4258の全分光計をチェックした。すると中心速度以外の分光計にも明瞭にスペクトル線が受かっているのが見えた。その形状からメーザーだと直感した。しかし、その速度を見た瞬間、目を疑った。銀河中心速度から大きい側（赤方偏移側）に最大毎秒1,000キロメートルも離れているではないか！もしこれが本当だったらとんでもないことだ。すぐに体中が熱くなった。電離ガスではなく分子である。銀河において中性ガスのこのような大きな速度が見つかったことはない（通常、毎秒±200-300キロメートル）。

しかし、もし何らかの間違いだったら大恥をかく。そこで誰にも言わずに一人で次の観測時に周波数等の設定を入念にチェックした。また、たまたま視線方向にある銀河系内のガス中にある他のスペクトル線ではないかと文献でチェックした。

さらに次回には銀河とその周囲を観測して確かにその銀河の中心から出ていることを確認した。こうして最終的にその銀河の中心から出ている毎秒1,000キロメートルの水メーザーであることを確信した。またそれまでに観測した全スペクトルを足し合わせて雑音を減少させたところ、速度が毎秒-1,000キロメートル近くのところ（青方偏移側）にも弱くメーザーが出ており、速度的に対称であることもわかった（図2）。

論文はネイチャー誌に投稿したが、レフリーの一人は、「この論文は間違いなく天文学者を自分の望遠鏡のところに走らせるだろう」と書いてきた。実際、1993年1月に論文²⁾が出版されると（実はそれ以前からレフリーの口から情報が漏れて）電波からX線までの多くの望遠鏡がその銀河の観測を始めた。

巨大質量ブラックホールの周りのガス円盤

われわれも米国のできたばかりの VLBA（超長基線電波アレイ）という電波干渉計に観測プロポーザルを提出して観測した。細かいものを見分ける能力が1秒角の千分の1以下という超高空間分解能である（東京から大阪にいる人が持つシャープペンシルの芯が見分けられる）。その結果（詳細は1995年の天文月報7月号の記事³⁾を参照）、図3のように半径が0.14-0.28パーセク（0.46-0.91光年）、厚みが0.0003パーセク以下、回転速度が770-1,080 km/sのガス円盤が発見された⁴⁾。この大きさは銀河全体の十万分の一程度

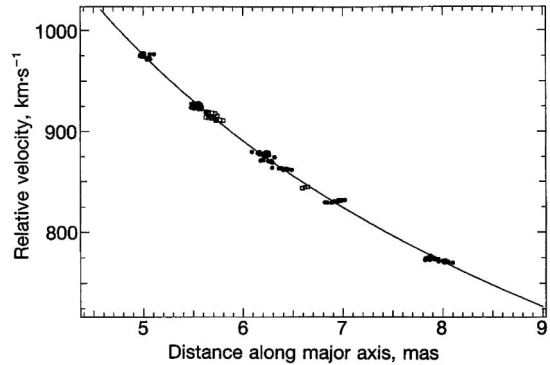


図4 図3のメーゼースポットの速度（縦軸）を銀河中心からの距離（横軸）の関数として示したもの。横軸の単位の mas はミリ秒角のこと。曲線はケプラー回転を表し、それからのずれは1パーセント以下である。

である。円盤は内側で傾き角が 83 ± 4 度の横向きであるが、外側に行くに従い、ワーブしている。ガス円盤の半径と厚みの比は温度が 400-500 K 程度のガスの静水圧平衡と矛盾しない。水メーザーが出ている高密度 ($10^7-10^{10} \text{ H}_2 \text{ cm}^{-3}$) ガスはピッチ角が 2 ± 1 度の渦巻状をしていると推測される⁵⁾。それがスペクトルの赤方偏移成分と青方偏移成分の強度の違い（図1）を生じていると考えられる⁶⁾。メーゼースポットの分布と速度の左右対称性からガスの軌道はほぼ円であると推測される。測定された毎秒1,080キロメートルという回転速度は銀河では圧倒的に大きいものであった。米国のベラ・ルービンがある研究会で、毎秒500キロメートル以上の銀河回転を見つけたら1ドル(!)を与えるという懸賞金を出しており、



図3 NGC 4258 の中心核に見つかった水メーザー円盤⁴⁾。半径は0.14-0.28パーセク（0.46-0.91光年）で、銀河全体の大きさの十万分の一程度である。観測されたメーゼースポットは点で示してある。中心付近で上下にあるのは連続波電波で観測されたジェットである（L. Greenhill, 私信）。

後日、われわれはいただくことになった。

ガス円盤の半径と回転速度から中にある質量は太陽の3,900万倍であることがわかる。その質量が一様球対称に分布しているとするとその密度は1立方パーセク当たり太陽の34億倍の質量となる。さらにガス円盤は図4のように内側で速く、外側でゆっくりと回転する正確なケプラー回転をしていた。銀河でケプラー回転が見つかったのは初めてであった。これは太陽系と同様に中心に重い物体があることを示している。ケプラー回転からのずれは1パーセント以下なので(ただし、期待される重力赤方偏移の毎秒4キロメートルを含む)、これから中心天体はガス円盤の内半径のさ

らに十分の一より内側(<0.01パーセク)に存在することになる。したがって、その密度は1立方パーセク当たり太陽の $\sim 10^{12}$ 倍の質量となる(1995年当時、直接測定された密度としては宇宙で最大だった)。これが星の集団だとすると短時間で衝突するか散逸してしまう。また最近のその短い時間に大量の星形成が起きた兆候もない。したがって、この中心天体はブラックホールの可能性が極めて高い。

それまでの光学観測によるブラックホールの証拠との違いはその質量密度による。その密度が星の集団では説明できないかどうかが問題である。そのためには高い角分解能によってブラックホー

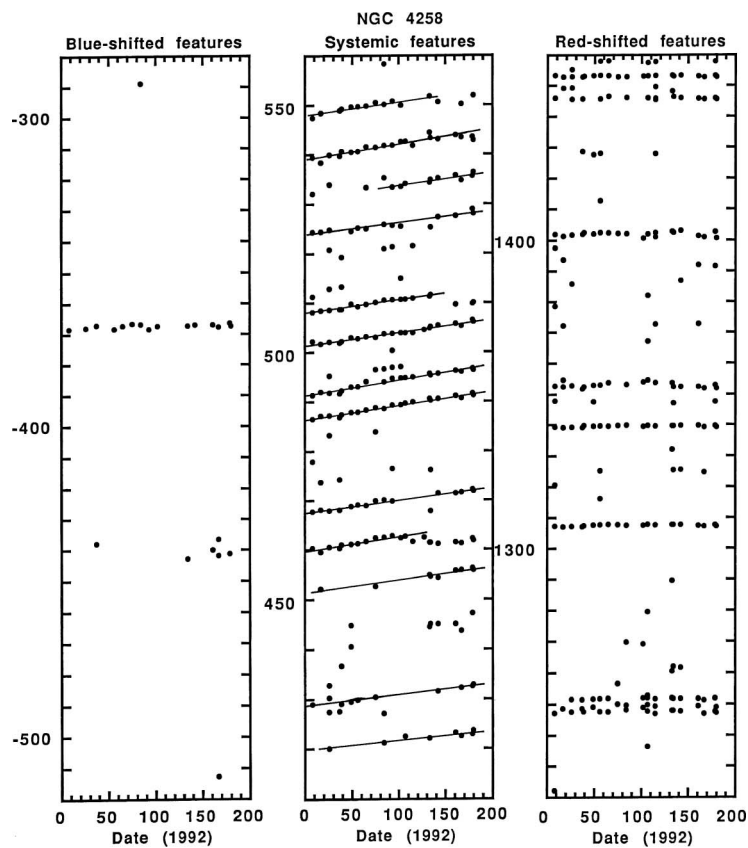


図5 図1のスペクトル線の速度変化。真中が銀河中心速度成分、左が青方偏移成分、右が赤方偏移成分で、横軸が1992年1月1日からの通算日、縦軸が後退速度である。銀河中心速度成分だけが一定の割合で速度が増加しており、銀河回転の加速度運動を示している。

ルのどれだけ近くを見ることができかが鍵となる。ハッブル宇宙望遠鏡の角分解能は0.1秒角を少し切る程度である。VLBIによる水メーザーの観測では0.001秒角を切る。その差は百倍である。これを体積に直すと3乗して百万倍となる。これがブラックホールの存在の確からしさの違いである。実際には銀河の距離などにも依存するが、観測手法としては6桁違うのである。

われわれはこの結果を1995年1月のネイチャー誌に出した⁴⁾。するとそれを見た英国ケンブリッジ大学のD.リンデンベルが著者全員に手紙を寄こした。そこには「私はそのような証拠が見つかるのを26年間、待っていた」と書かれてあった。リンデンベルとは1969年に銀河の中心に巨大質量ブラックホールを最初に予言した一人である。生きている間に自分が予言したものが見つかってよかったということであろう。

副産物—銀河の距離の直接測定

NGC 4258の水メーザーの速度をモニターしていると高速度成分の速度はほとんど変化しないのに対して銀河中心速度成分は一定の割合で増加しているのが観測される^{7), 8)} (図5)。これは銀河の回転の加速度運動が直接に見えているのである。回転速度が大きく、軌道の曲率が大きいために測定可能となったのであり、系外銀河では初めてである。その後、あと2個の銀河でも観測されている。

詳細は別の機会に述べるとして、この加速度運動とガス円盤の構造を用いると純粋に幾何学だけで銀河の絶対距離を直接的に求めることができる^{3), 4)}。距離の誤差は観測上の測定誤差だけで決まる。その結果、NGC 4258の距離は 7.2 ± 0.3 メガパーセク ($2,300 \pm 800$ 万光年)と決定された⁹⁾。現在、さらにより精度の高い距離の測定が継続されているとともにセファイドによる距離との比較がなされている。しかし、この手法が適用できているのは今のところNGC 4258だけであり、IC

2560で現在努力中である。

NGC 4258は系外銀河としては例外的に物理量が正確に求まるので、宇宙の実験室としていろいろな面で利用されている。また現在までに中心に水メーザーが発見されている銀河は70個程度に及び、そのうちVLBI観測によってガス円盤が検出されているのは8個である。最近は統計的にもいろいろおもしろい結果が出ているが、別の機会にゆずる。

「果報は寝て待て」の意味するところ

それは「寝る前に十分に準備しろ」ということだろう。入念に準備したうえで寝ていれば、運が良ければ果報が転がり込んでくる。毎秒±1,000キロメートルの水メーザーの場合は準備をしてもらったのは大先輩の方々であった。45メートル電波望遠鏡と世界でそれだけがもつ8台の電波分光計である。分光計が1,2台しかなければ今でもその高速度メーザーには誰も気がついていないかもしれない。そしてあと付け加えるとすれば、観測の前日に一人で準備をしたことが功を奏したのかもしれない。分光計を全部周波数方向に並べて、何もあらしめない（と誰もが思う）毎秒3,850キロメートルの速度幅を観測するという「馬鹿馬鹿しいこと」は大勢の人間の合意のもとでは無理であったかもしれない。

1932年にカール・ジャンスキーが宇宙電波を発見して以来、電波天文学でノーベル賞を受賞したのは、(1) 開口合成型干渉計の発明による電波銀河の発見(ライル)、(2) パルサーの発見(ヒューイッシュ)、(3) 宇宙背景放射の発見(ペンジャス、ウィルソン)、(4) 連星パルサーの観測による重力波の(間接的)発見(ハルス、テーラー)、(5) 宇宙背景放射の黒体性と異方性の発見(マザー、スムート)である。最後のものを除いては、宇宙電波の発見も含めて、それを目的として発見したものではない。予想外の偶然から見つかったものである。ヒューイッシュなどは純粋な

天文学者ではなく、太陽地球間のプラズマの研究者だった。ハルスはまさか自分が重力波の研究をするとは夢にも思っていなかったので、あわてて本屋に行って相対性理論の本を買ってきて勉強を始めたほどである。

白川さんは大学院生が触媒の量を千倍間違えなければノーベル賞もなかった。数十年か百年に一度しか起きない超新星爆発が運よく起きたからこそ小柴さんはノーベル賞を受賞することになった。利根川進は「グラント（科研費）の申請書に書かれた研究計画でノーベル賞を受賞したものはほとんどない。独創的な研究はアクシデントで生まれることが多い」と言っている。そして、それらの幸運の裏には、世界でそこにしかない装置やその人たちだけが行った行為がある。

今まで誰も見たことがないものを見れば新しい現象が出てくる可能性が高い。そして運が良ければ、その発見はブレークスルーを生むかもしれない。幸運は誰の目の前も通過するが、その運をつかむためにはそれを認識できるだけの見る目も必

要なのかもしれない。

日本学士院賞の受賞に際し、たいへんな苦勞をして野辺山 45 m 電波望遠鏡と 8 台の高分散音響光学型分光計を準備して下さった大先輩の方々ならびに野辺山宇宙電波観測所の設立に尽力していただいたすべての方々に深く御礼申し上げます。また学士院賞に推薦していただいた方にも深く感謝したいと思います。このような多くの方々の協力と支援なしにはこの幸運は存在しませんでした。

参考文献

- 1) Haschick A. D., Baan W., 1990, ApJ 355, 23
- 2) Nakai N., Inoue M., Miyoshi M., 1993, Nature 361, 45
- 3) 中井直正, 1995, 天文月報 88, 285
- 4) Miyoshi M., et al., 1995, Nature 373, 127
- 5) Yamauchi A., et al., 2005, PASJ 57, 861
- 6) Maoz E., McKee C. F., 1998, ApJ 494, 218
- 7) Hashick A. D., Baan W., Peng E. W., 1994, ApJ 437, L35
- 8) Nakai N., et al., 1995, PASJ 47, 771
- 9) Herrnstein J. R., et al., 1999, Nature 400, 539