

活動銀河中心核をとりまくガスの構造 — 真の中心核はどこか —

澤田 聡子

(国立天文台 VERA 推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1)

e-mail: satoko@hotaka.mtk.nao.ac.jp

これまで活動銀河中心核の VLBI 観測は連続波の観測が主流であった。しかし最近、連続波にレーザー、吸収線を組み合わせさせた観測が行われるようになり、ガスの運動の推察やそれを用いた中心核の位置の特定が可能になった。さらに、新しい VLBI 技術の発展により、これまで検出出来なかった天体が観測可能になってきている。

1. 銀河中心核領域の目撃

VLBI は、既存の天体観測装置の中では唯一ミリ秒角を切る高い空間分解能を達成する装置である。コンパクトな領域で高い輝度温度の放射を出す活動銀河中心核の観測に都合が良く、これまで数多くの銀河の中心核領域を観測するのに使用されている。これまでの活動銀河中心核の VLBI 観測は、連続波を用いたシンクロトロン放射するジェットを観測がほとんどであった。しかし最近、レーザー放射などのスペクトル線を用いた VLBI 観測が活動銀河中心核にも実施されるようになり、中心核周囲のガス構造が見えるようになってきた。

1983 年、南天の系外銀河 NGC4945 の中心核から水レーザー放射が検出されて以来¹⁾、活動銀河中心核にも天体レーザー源が存在することが知られるようになった。活動銀河中心核からのレーザー放射は、銀河系内の星形成領域や晩期型星で見つかる天体レーザー源の百倍、千倍も強力であり、銀河中心核の活動性と関連があると考えられている。1995 年、アメリカの VLBI システム、VLBA を用いた NGC4258 の水レーザーの観測²⁾により、NGC4258 の周囲に内半径 0.13 パーセク、外半径 0.26 パーセクの水分子円盤が存在していることが確かめられた。この円盤から明らかになった注目

すべき結論がふたつある。ひとつは、円盤の内側の限られた中心核領域の質量が求められ、中心に太陽の 3600 万倍の質量のブラックホールがあると結論づけられたことである。もうひとつは、円盤の回転によるレーザーの視線速度の時間変化および 1000km/s で運動するレーザースポットの固有運動が同時に観測されていたことから円盤の回転半径が求められ、その円盤の視野角から、銀河までの距離を直接精密に測定することが出来たことである³⁾。

活動銀河中心核の数パーセクスケールの構造やガスの運動を調べる事が出来る重要な手段として、活動銀河中心核のレーザーの VLBI 観測は一躍脚光を浴びることとなった。数多くの系外銀河に対してレーザー探査が行われ、その結果現在、中心核からレーザー放射が検出されている天体は 20 数天体におよび、そのうちいくつかの天体について VLBI 観測が行われている。しかし、それらのすべてが NGC4258 のような回転円盤で説明出来る観測結果をもたらしたかということ、実はそうではなかった。回転を示す速度勾配が見られないもの、レーザーの視線速度が検出されないもの、レーザーの分布が中心核から噴き出るジェットに沿っているものなど、単純に回転円盤とはいえない結果も報告されてきたのである^{4), 5)}。レーザー放射を観測

するには、分子の励起や、たねとなる電磁波の入力、そしてレーザー放射の狭い指向性など、限られた条件が必要なため、水分子が存在しても、それら全体からレーザー放射が検出されるとは限らない。NGC4258 はレーザー観測だけで中心核領域のガスの構造が特定された特殊な例と言わざるを得なくなってきた。また、NGC4258 で明らかになった動力学中心には電波放射が見られず、そこから噴き出した連続波ジェットが微かに検出されただけであった。これまでは、銀河の中心は「中心の一番明るいところ」と漠然と考えられてきたが、VLBI で実際に中心核領域が目撃出来るようになると、中心核の位置は、必ずしも明るい放射が起こっている場所ではなかったのである。

2. NGC3079 の観測

おおぐま座の系外銀河 NGC3079 は、我々からは銀河を横向きに見ているエッジオン銀河である。銀河系から 15Mpc の距離にあり、宇宙の膨張にしたがって我々から見て 1117km/s の速度で遠ざかっている。中心核からは水レーザー放射が検出されており⁶⁾、中心核領域に 1 パーセクスケールの連続波構造をもっている⁷⁾。また、中心核領域に中性水素原子の吸収線があることが知られていた⁸⁾。つまり、水レーザー放射に加え、連続波放射や中性水素吸収線も同時に観測し、それらの観測結果から総合的に活動銀河の中心核領域の構造を調べることの出来るユニークな天体である。この天体についても、過去に VLBI 観測が実行されたことがあるが^{3), 9), 10)}、連続波構造からはどこが中心核でどこがジェットか決定出来ず、レーザーからも速度勾配が見られないことから動力学中心を特定することが出来ていなかった。

我々は、この天体に対して前述の VLBA、アメリカの電波干渉計 VLA、アメリカ、グリーンバンクの 43m 望遠鏡、ドイツ、エフェルスベルクの

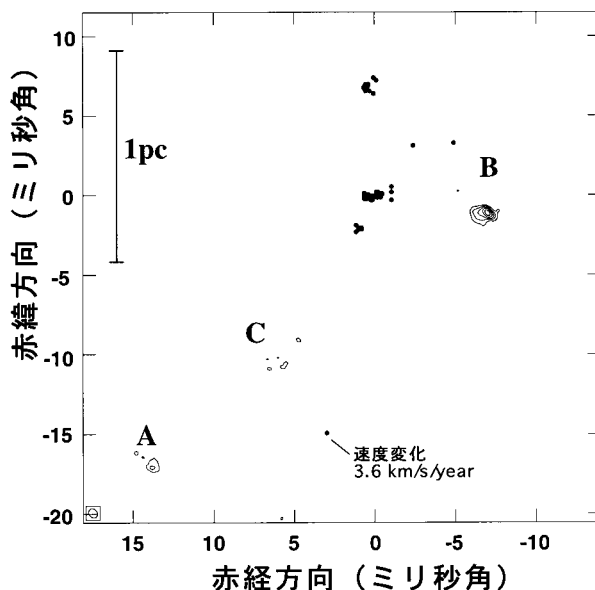


図1 一番明るいレーザーを原点にとったときの、水レーザースポットと連続波構造 A, B, C. レーザーは大まかに南北に分布している。A, B, C は南東-北西方向にほぼ一列に並んでいる。

100m 電波望遠鏡等、可能な限りの望遠鏡を動員して世界最高感度の VLBI 観測を行った^{11), 12)}。この観測から、多周波数の連続波情報、連続波成分の位置やレーザーの時間変化情報、中性水素の中心核領域の分布情報を得て、中心核がどこか、そして中心核領域のガスはどう分布しどう運動しているか、を探った。

3. 中心核はどこか

図1は観測から得られた中心核の連続波構造とレーザースポットの電波画像である。南東-北西方向に連続波放射をしている A, B とその間の微かな C が並んでいる。この連続波構造は、過去の観測⁶⁾ですでに知られていた構造である。A, B が、見かけで光速の 10% 程度の速度で互いに離れていくことが知られており、どちらがジェットか分からないが、光速に近いジェットの運動を見ていると考えられていた。一方、レーザーは、大まかに南北方向に分布しているが、前述の通りこの分布に

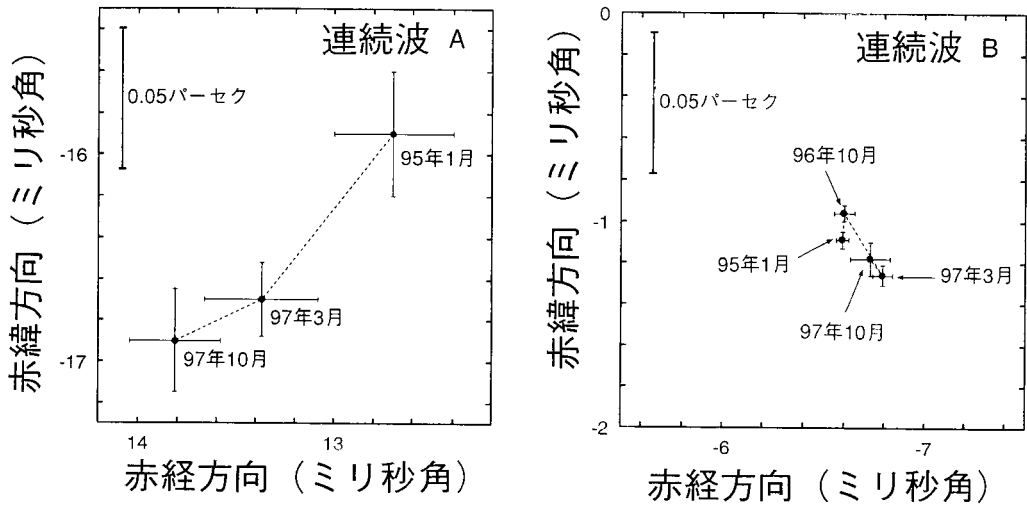


図2 一番明るいメーザーを基準としたときの、連続波 A と B の運動。A の運動は、A-B の並びと方向がほぼ垂直であり、AB 間の離れる速度ともほぼ一致する。一方、B にはそのような明確な動きは見られない。

沿った明らかな速度勾配はない。我々は、1996年から1998年にかけて、メーザースポットと連続波構造のモニター観測を行ない、いちばん明るいメーザースポットを位置の基準として、そこからAとBがどう動いていくか調べた。すると、AはAとBの並ぶ方向に沿ってだんだん遠ざかっているのに対し、Bとメーザーとの距離はほとんど変化がないことがわかった(図2)。もしメーザーが、中心核の周囲の回転円盤に付随しているとする、メーザーはこの領域の動力学中心である中心核に重力的に束縛されているはずである。とすると、中心核はBである可能性が高い。この間、個々のメーザースポットの分布には有意な変化は見られず、安定していた。これらのメーザースポット全てが中心核Bに重力的に束縛されたガスの一部であると考えられる。

中心核がBであることは、他の観測結果からも支持される。ひとつは、AとBの連続波スペクトルである(図3)。VLBIで観測される連続波放射は、

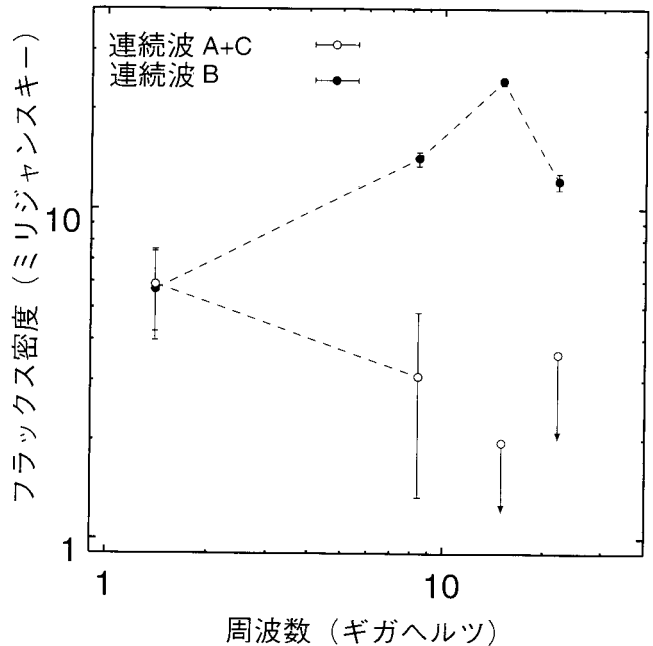


図3 連続波のスペクトル。全て、1.4GHzのときの空間分解能でフラックス密度を求めている。A+CとBとで比較しているのは、1.4GHzでは空間分解能不足でAとCが分解できなかったため。

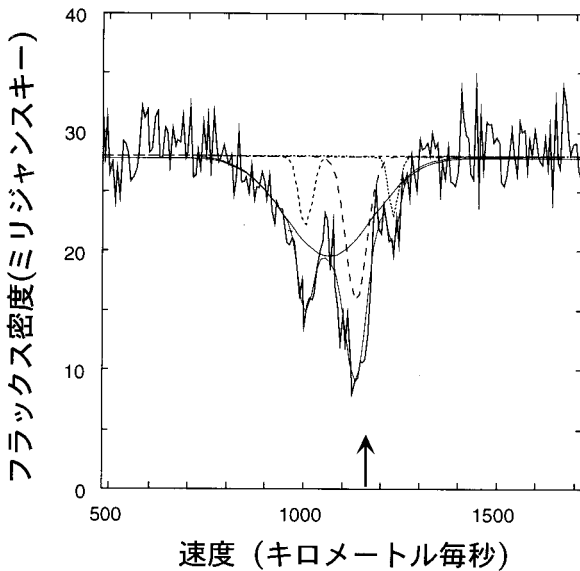


図4 VLBI で得られた中性水素原子の吸収線. 青線で示されたものが, 今回の観測で新たに検出された, 速度幅の広い吸収線. 矢印は銀河系統速度 1117 km/s を示している.

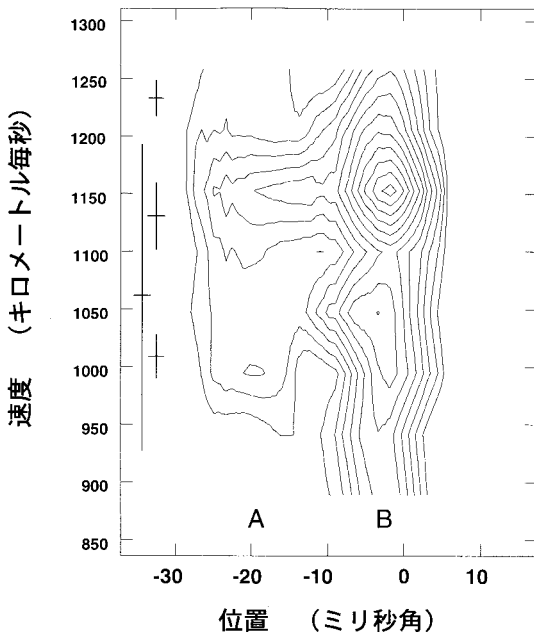


図5 中性水素原子の吸収線の位置-速度図. 直線 A-B に沿った吸収量の分布を表している. 図の左にある十字形は, 吸収線の中心速度と速度幅を示している. 速度幅の狭い3本の吸収線は A にも B にも見られるが, 速度幅の狭い吸収線は B のみに存在している.

高速で運動するプラズマからのシンクロトロン放射であり, そのスペクトルは, 周波数対フラックス密度の対数-対数グラフ上で, 左上がりの傾いた形になる. しかし, プラズマが高密度になると光学的に厚くなり, 低い周波数で吸収が起こってスペクトルは凸型になる. 中心核近傍では, プラズマが高密度に分布していると考えられ, 中心核はしばしば凸型のスペクトルを持つ. もし中心核が B とすると, 図3のスペクトルの形はうまく説明ができる.

さらに, 中心核が B であることは, 中性水素吸収線の観測結果からも説明がつけられる.

VLBI 観測では, 空間分解能が高くなるため, 中心核からの連続波を背景とした吸収線の検出に有利に働く. 図4は, VLBI 観測で得られた中心核の中性水素吸収線のスペクトルである. 銀河系統速度付近に4つの速度成分の吸収線が検出されたが, 今回の観測により 1061 km/s 付近を中心に速度幅の広い ($\sim 265 \pm 23$ km/s) の吸収線を初めて検出した. これらの吸収線がどこで起こっているのかを知るため, 連続波 A, B に沿った位置-速度図 (図5) を見ると, 3つの速度幅の狭い吸収線は A, B 両方に存在しているのに対し, 広い吸収線は中心核 B に偏在していることがわかる. これは, 中心核近傍領域に, 中性水素ガスが激しく運動していることを示しており, 銀河中心核周囲のガス円盤の手前側の中性水素から吸収線が観測されていると説明が出来る.

4. ガスの回転軸の向き

以上の観測結果と考察から, 中心核は B で, 水分子, 中性水素原子のガスが中心核周囲に存在していることがわかった. そして, ガスは中心核周囲の円盤を形成しているらしいことが示された. ガスが中心核周囲を回転しているという証拠は他にあるだろうか. 実は,

水メーザーを数年かけてモニター観測をしていくと、スペクトルの速度が赤方偏移する方向に時間変化する成分を検出できることが報告されている。国立天文台野辺山の中井氏の観測によると最も速度変化の大きいものでは、1年間に3.7km/s ずつ時間変化する。このような水メーザーの速度の時間変化は、前述の通り NGC4258 でも観測されており、メーザーが回転円盤に付随して、我々の回転軸への視線方向を交差して動くときの中心への加速度と説明されている。同様の考察をここでも持ち出すと、最も速度変化の大きなメーザーは、我々から見て回転円盤の手前側にいて、かつ回転軸に乗っていないからである。すると、回転軸は我々から見て中心核 B とそのメーザーを通る向き (P.A. ~ -30 度; 時計で言うと、1時の方向) になるはずである (図6)。

回転軸の向きは、南北方向から 30 度傾けた向きと結論づけた。このような回転軸の回りをメーザーが回転しているとすると、メーザーの南北の分布の広がりはどう説明したらよいであろうか。まず、思いつくのは、薄い円盤が面をほとんどこちらに向けた状態にいるというものである。メーザーの視線速度からメーザーの回転速度、メーザーと中心核 B との距離からメーザーの回転半径をそれぞれ求め、これらのメーザーにケプラー回転が成立するとして計算をした。その結果、水メーザーのモニターから得た、1年に3.6km/s という加速度を達成しようとするすると矛盾が起こることがわかった。加速度は、メーザーの回転速度の二乗に比例、回転半径に反比例する。薄い円盤が面をこちらに向けているモデルでは、回転速度の割に回転半径が大きすぎるのである。よって、薄い円盤が面をこちらに向けているという説は棄却される。となると、次に思いつくのは、円盤を真横から見ても水メーザーの南北に広がる分布が説明できるような厚みのある円盤である。このモデルにそって同様にケプラー回転でフィットすると、今度は、解を得ることが出来た(図7)。この結果から、中心の質量を求めると、太陽の約

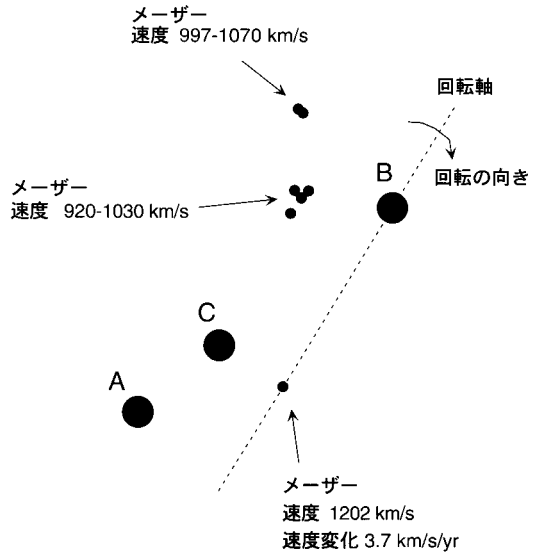


図6 これまでの観測結果をまとめ、NGC3079の中心核領域の構造はこのように説明される。中心核はB、回転軸はBと速度変化の大きいメーザーを通る。

100万～1000万倍の質量と見積もられる。また、中心の系統速度は $1177 \pm 192 \text{ km/s}$ となり、銀河系統速度 1117 km/s がこの範囲内におさまる結果となった。どちらも誤差は小さいとは言えないが矛盾のない値である。

ここまでの話をまとめると、図6に示す通り、NGC3079の中心核はB、回転軸はBと速度変化の大きなメーザーを通り、我々は回転円盤をほぼ真横から見ている、という説明が可能である。

5. 今後の発展

以上の議論の真偽を確かめる直接的な方法は、水メーザーのVLBIモニター観測をさらに継続し、水メーザーの固有運動を検出して回転運動にのっているかどうかの検証を行うことである。この天体までの距離は15Mpcであるから仮にメーザーが 100 km/s の速度で我々の目の前を横切るとすると、我々から見てメーザーは1年に1マイクロ秒角動くことになる。メーザーの固有運動を検出するた

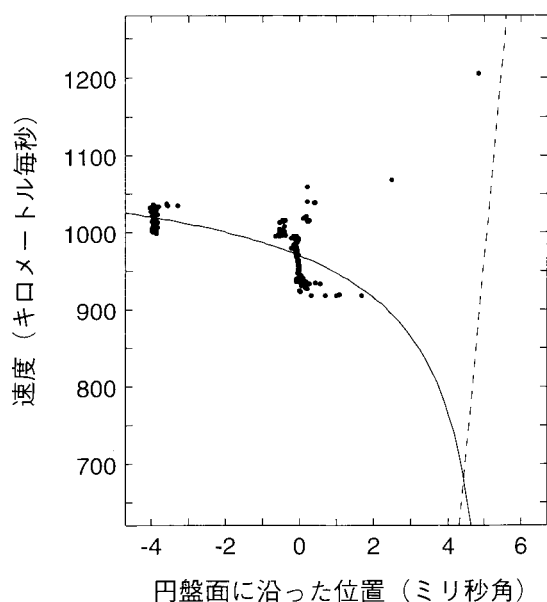


図7 メーザースポットの位置-速度図. 円盤を真横から見ていると仮定している. 実線はケプラー回転のベストフィット. 破線は 3.7km/s の速度変化を持つ回転軌道.

めに, 数年に渡る VLBI モニター観測を継続していくことが重要である.

銀河中心核からのメーザー放射を持つ天体は, 20 天体が知られていると前述したが, それらのうち VLBI で画像が描かれているものは現在たった 4 天体である. その理由は, これらの天体の多くが現在の VLBI 観測ではメーザーが暗すぎて観測できない, ということである. これまでの VLBI 観測では, 大気が揺らいでしまわない短い時間内に天体を検出しなければならないので検出できる天体数に限界があった. しかし, 現在国立天文台水沢を中心とした日本の VLBI グループが推進する VERA 計画は, 世界初の位相補償型 VLBI 観測装置として, この問題を解決出来る. VERA は, 観測ターゲットとなる天体の他, その近傍にある明るいクエーサーを参照天体として同時に観測し, 大気の揺らぎを補正して長時間積分を可能にする. その結果, これまでの VLBI 観測では検出できなかった天

体が数多く観測可能になり, 銀河中心核領域のガス構造について統計的な議論も出来るようになるだろう.

本稿は, 筆者の博士論文の内容をもとに紹介したものです. 本研究を進めるにあたり, 指導教官であった井上允, 共同研究者の中井直正, 柴田克典, 亀野誠二, V. Migenes, P. J. Diamond 諸氏に御礼申し上げます.

参考文献

- 1) dos Santos P. M., Léine, J. R. D. 1979, Nature 278, 34.
- 2) Miyoshi M., Moran J. M., Herrnstein J. R., Greenhill L. J., Nakai N., Diamond P. J., Inoue M., 1995, Nature 373, 771.
- 3) Herrnstein J. R., Moran J. M., Greenhill L. J., Diamond P. J., Inoue M., Nakai N., Miyoshi M., Henkel C., Riess A., 1999, Nature 400, 539.
- 4) Greenhill L. J., Moran J. M., Herrnstein J. R., 1997, ApJ 481, L23.
- 5) Claussen M. J., Diamond P. J., Braatz J. A., Wilson A. S., Henkel C., 1998, ApJ 500, L129.
- 6) Henkel C., Gusten R., Downes D., Thum C., Wilson T. L., Biermann P. 1984, A&A p141, L1.
- 7) Irwin J. A., Seaquist E. B., 1988, ApJ 335, 658.
- 8) Gallimore J. F., Baum S. A., O'Dea C. P., Brinks Pedlar A., 1994, ApJ 422, L13.
- 9) Haschick A. D., Baan W. A., Schneps M. H., Reid M. J., Moran J. M., Güten R. 1990, ApJ 356, 149.
- 10) Trotter A. S., Greenhill L. J., Moran J. M., Reid M. J., Irwin, J. A., Lo, K. Y. 1998, ApJ 495, 740.
- 11) Satoh S., Inoue, M., Nakai N., Shibata K. M., Kamenno S., Migenes V., Diamond P. J. 1999, ASR 23, 1025.
- 12) Sawada-Satoh S., Inoue M., Nakai N., Shibata K. M., Kamenno S., Migenes V., Diamond P. J., 1999, PASJ submitted.

Gas structure of AGN

SAWADA-SATOH Satoko

National Astronomical Observatory, VERA Project
181-8588

Abstract: Recent spectral VLBI studies towards AGN allow us to get a lot of knowledge about gas structure around AGN, and to estimate exact location of nucleus. New VLBI system, for example VERA, will provide insights into the inner region of AGN.