

# サブミリ波系外水メーザーの観測研究 —活動銀河中心核周囲の新たなプローブを求めて

萩原喜昭・三好真

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: yoshiaki.hagiwara@nao.ac.jp, makoto.miyoshi@nao.ac.jp

土居明広

〈宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉

e-mail: akihiro.doi@vsop.isas.jaxa.jp

堀内真司

〈Canberra Deep Space Communication Complex, CSIRO, P.O. Box 1035, Tuggeranong, ACT 2901, Australia〉

e-mail: shoriuchi@cdscc.nasa.gov

ALMAにより、サブミリ波321 GHz帯の水メーザーを近傍の活動銀河核Circinus銀河（コンパス座）に初めて検出した成果を解説する。メーザーとは水酸基（OH）や水などの分子が、ある一定の物理条件下で強力な電磁波を放射する現象であり、銀河系内の晩期型星などで観測される。検出した321 GHz水メーザーのスペクトルは、同銀河の系統速度の両側にドップラー偏移する多数の速度成分からなり、22 GHz帯で放射される水メーザーと同様に回転円盤からの放射を示唆する。22 GHz帯のメーザーでは見えない高速度成分も微弱ながらとらえた。より高いエネルギーの励起状態にある321 GHz帯のメーザーは、活動銀河核周囲のさらに内側の領域に分布する高密度分子ガスの運動をトレースしている可能性もあり、活動銀河中心部のガス構造を探る新たな手段となるかもしれない。

## 1. はじめに

星形成が活発な領域や晩期型の星でよく観測される星間分子は、ある一定の物理条件下で局所的に増幅されて強い電磁波を発する。この現象はメーザー（Maser: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation）と呼ばれ、可視光で見えるレーザーのマイクロ波版である。（メーザーについての詳細な説明は本誌バックナンバーの解説記事などを参照されたい<sup>1)</sup>。）

メーザーはわれわれの住む銀河系（天の川銀河）だけでなく、系外銀河でも観測されることが知られる。特に波長1.3 cm帯で観測される水分子輝線（周波数：22.23508 GHz）のメーザーは150以上の銀河に見つかっている<sup>2)</sup>。メーザーのフラックス強度から求めた光度が太陽光度のおよそ100倍を超える（銀河系最強のメーザーの100倍以上の明るさ）メーザーは系外銀河だけで観測され、メガメーザーと呼ばれる。水メガメーザーの観測が始まって以来30年弱の月日が経過した。

表1 代表的なサブミリ波帯水メーザーの周波数と  
これまでに検出された銀河系外水メーザー.

周波数 (GHz)	エネルギー準位 (温度換算) (K)	系外銀河中 での検出例	天体例(個)
22.235	644	○	>150 (AGN, 星形成銀河)
183.308	205	○	2 (AGN, 赤外 線銀河)
321.226	1862	○ (本研究)	1
325.153	470	×	
439.151	1089	△ (要検証)	1
658.007	2361	×	

水メガメーザーを道具として利用した研究は格段の進歩を遂げ、活動銀河核 (AGN: Active Galactic Nuclei) の周囲を取り巻くガスの分布を調べたり、銀河の測距やハッブル定数を計算する手段としても利用されている<sup>3)</sup>。系外水 (メガ) メーザーは、これまでほとんど波長 1.3 cm 帯 (周波数 22 GHz 帯) で観測されてきた。一方、サブミリ波帯と呼ばれる波長 1 mm 以下の短い波長帯でも、(天の川) 銀河内の水メーザーの観測研究が活発になされている<sup>4)</sup> (表1)。

われわれは、このサブミリ波帯、特に波長 0.93 mm (周波数: 321.226 GHz) 帯で発振される水メーザーに着目して、系外銀河でサブミリ波メーザーの研究を新たに開拓できないだろうかと考えた。そこで、近傍の活動銀河核数天体に対して、水メーザーの探索をこの波長帯で最高検出感度、空間分解能を達成する ALMA (アルマ) を利用して行うことにした。本記事ではその成果とそれに至るまでの簡単な経緯を解説する。

## 2. 活動銀河核中の水メーザー

銀河が明るく見えるのは、1千億以上の恒星からの光が足し合わさって見えるからである。一方、銀河のなかには恒星以外のエネルギー源で中心部が明るく輝く活動銀河核 (AGN) がある。活動銀河核の中心には超巨大ブラックホールがあり、その周囲に落下するガスが重力エネルギーを

解放して強力なエネルギー源となり、その一部が電磁波として放射される。AGNとは銀河中心部のほんの狭い領域から銀河一つ分以上の明るさを放ち輝いている天体である<sup>5)</sup>。銀河系外の水メーザーのほとんどは活動銀河核、特に狭輝線活動銀河核に存在することがわかっており、AGNの活動性が強力なメーザーの励起に関係していることを示唆する。

## 3. ALMAによる観測

### 3.1 データ配布、解析、観測結果

これまで我々は国内外の主要な電波望遠鏡、電波干渉計のデータを扱ってきたが、ALMAのデータを解析するのは初めてであるので、事前に東アジア ALMA 地域センターが主催する解析講習会に出席して準備をしたつもりであった。しかし実際、自分のデータが手元に届いてみるとどこから手を付けてよいのかわからずにほとんど何もしないまま1カ月以上過ぎていた。その後2天体目のデータが届いた際に気を取り直して1天体目のデータを恐る恐る見てみた。しかし、メーザーは受かっていないようだ。視野や速度範囲を広げて自分で再解析してみたがやはりメーザーの輝線は見えない。

その後間もなくして2天体目の Circinus (サーシナス、あるいはシルシナス) 銀河のスペクトルを見てみた。「あ、受かっている。」—大体予想した周波数付近を中心に、メーザー特有の非常に狭い線幅をもったスパイク状の輝線が銀河の系統速度の両側に多数分布していることが一目でわかるスペクトルであった (図1)。自分が予想した以上にはっきりとメーザーが検出された。銀河系から最も近傍 (4メガパーセク) の活動銀河核 (2型セイファート銀河に分類される) である Circinus 銀河は、最も強力な 22 GHz 帯の系外水メーザーを放射することが知られており<sup>6)</sup>、より高い周波数で発振する 321 GHz 帯の水メーザーを探索するための最有力候補天体であったことはい

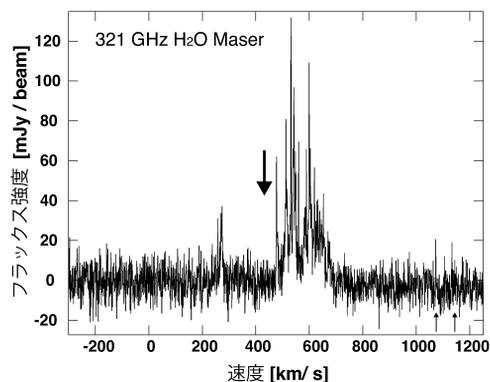


図1 Circinus銀河から検出した321 GHz水メーザーのスペクトル<sup>1)</sup>。横軸は視線速度（周波数から換算）、縦軸はメーザーのフラックス強度。下向き矢印は銀河の系統速度（433 km/s）を示す。上向きの矢印は本文中で説明した高速度メーザー成分。

までもない。

### 3.2 オーストラリア Tidbinbilla 望遠鏡

Circinus銀河の22 GHz帯の水メーザーについての研究論文はこれまで多数出版されており、その激しい強度変動（銀河面の反対側にある銀河なので、銀河面上での星間シンチレーションの影響もある）を示すメーザーのスペクトルは系外メーザーのなかでは非常にユニークである<sup>7)</sup>。まずALMAによる321 GHz帯のメーザースペクトルを見たとき、ほぼ同時期に観測した22 GHz帯のメーザースペクトルと比較する必要性を感じた。励起状態の異なる22 GHzのメーザー輝線スペクトルと比較することは、321 GHzのメーザーの放射源の起源を知るうえで手がかりとなるからである。幸いオーストラリアのTidbinbilla（ティドビンビラ）70 m電波望遠鏡のアーカイブデータに、われわれのALMA観測と比較可能なデータが含まれていることがわかった。同望遠鏡は南半球最大の口径をもち、22 GHz帯では南半球最高感度を誇る<sup>\*1</sup>。Circinus銀河の22 GHz帯メーザーの

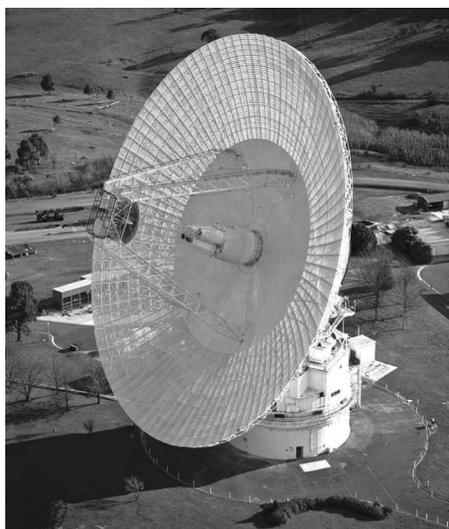


図2 オーストラリアにあるTidbinbilla 70 m電波望遠鏡（Copyright: Canberra Deep Space Communication Complex）。同望遠鏡は首都キャンベラの郊外に設置されている。

フラックス強度は、10–40 Jy（ジャンスキー）とたいへん明るいので、同望遠鏡の観測システムのチェック時に頻繁に試験観測されている。ALMAと同時期に観測された試験データのアーカイブがあるお陰で、321 GHzメーザーのスペクトルの比較にはたいへん役に立った。後で述べるが、このTidbinbillaのデータから新しい事実がわかった。

## 4. 321 GHz 帯水メーザーの起源

### 4.1 Circinus銀河の321 GHz 帯水メーザー

Circinus銀河からの水メーザーの起源は一体何であろうか。今回初検出した321 GHz水メーザーの特長をまとめると以下の4点に集約される。

1) フラックス強度は、22 GHzメーザーの100分の1以下、2) 銀河の系統速度に対して赤方偏移している速度成分と青方偏移している速度成分が

<sup>\*1</sup> Tidbinbilla 70 m鏡はCSIRO（オーストラリア連邦科学産業研究機構）により運用され、NASA（アメリカ航空宇宙局）の深宇宙ネットワークの一部として宇宙探査機との通信に使われている。空き時間の一部は電波天文観測に割り当てられ、観測時間は世界の天文学者に公開されている。

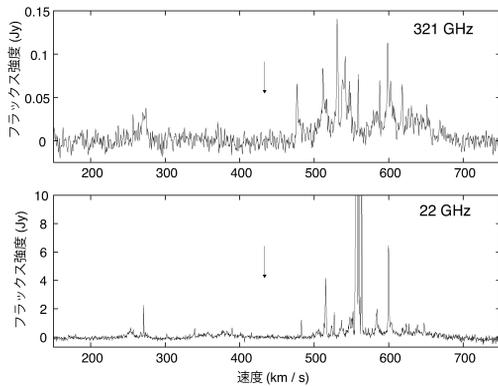


図3 Circinus 銀河の 321 GHz 帯メーザー（上段：2012年6月測定）と 22 GHz 帯メーザー（下段：同年9月に測定）のスペクトルを並べて比較した。縦軸はフラックス強度 (Jy)，横軸は視線速度 (km 毎秒)，矢印は銀河の系統速度をそれぞれ示す。(下段図の 10 Jy 以上のフラックスは本図では省略した。)

ある。22 GHz 帯水メーザーと同様に、赤方偏移した速度成分のフラックス強度が強い、3) 321 GHz メーザーの速度範囲 ( $V=270\text{--}670\text{ km/s}$ ) は 22 GHz のそれ ( $V=50\text{--}900\text{ km/s}$ ) と比べると似ているが狭い。一方で、22 GHz では見えない高速度メーザー成分 (系統速度から大きく  $635\text{ km/s}$  赤方偏移している) が、検出限界付近のレベルでかろうじて見える (図1、4) (およそ  $0.6$  秒角の空間分解能では) メーザー源の空間的な構造が見えない。1) を除いて、22 GHz メーザーとほぼ相似している (図3)。3) では周波数間で、メーザー源の空間分布の若干の違いがあることを示唆しているのかもしれない。

一つ気になるのがフラックス強度の (数日周期以上の) 時間変動である。Circinus 銀河を ALMA で観測した 2012 年の 6 月以降、22 GHz のフラックス強度がかつて計測されることがない強度以上に増光 (フレア) していることを、Tidbinbilla のデータを解析中に見つけた<sup>8)</sup>。特に 2012 年の 9 月には、フラックス強度は  $70\text{ Jy}$  以上を超えており、過去の論文で報告されている最大強度およそ  $40\text{ Jy}$  を優に超えていることが新たに

わかった。この 22 GHz メーザーのフレア現象の発見は非常に興味深い成果なので、本研究とは別に研究論文にまとめることにした<sup>8)</sup>。

#### 4.2 22 GHz 水メーザーとの比較

Circinus 銀河には前述した強力な 22 GHz 水メーザーの存在が知られる。メーザー源の分布はミリ秒角分解能でのイメージングを可能にする VLBI (超長基線電波干渉計) によって調べられた。その結果、メーザーは銀河の力学中心にある  $1.7 \times 10^6$  太陽質量の超巨大ブラックホールの周囲を取り巻く半径  $0.1\text{--}0.4$  パーセク (約 2 ミリ秒角に相当) のケプラー回転円盤上に分布していることがわかった<sup>9)</sup>。われわれが観測した 321 GHz 帯の水メーザー源の空間分布は ALMA では分解できない。22 GHz 帯のメーザーと同様な分布を期待すると、321 GHz 帯で約 2 ミリ秒角分解能以下での観測が必要になるので、メーザー源の分布の研究はサブミリ波 VLBI の実現まで待つことになる。

#### 4.3 高速度成分の発見

我々は 22 GHz のメーザーが 2012 年の 6 月にはフレアしていたことを突き止めた。Tidbinbilla のスペクトルの速度範囲の上限は  $V=800\text{ km/s}$  までであった (図3)。一方で、ALMA の 321 GHz メーザーのスペクトルは  $V=1,200\text{ km/s}$  の速度付近までカバーしており (図1)、検出限界レベル ( $3\sigma$ ) ながら、 $V=1,069\text{ km/s}$  にメーザーがかろうじて見える (図4)。干渉計観測の利点として振幅と同時に位相も測定できる。 $V=1,069\text{ km/s}$  付近に微弱ながら見える輝線の位相はやや固まって見え、検出を支持しているように見える (図4)。同様に、 $V=1,130\text{ km/s}$  付近にも微弱な速度成分が見える。これら高速度メーザー輝線が本物であるかどうかは今後の観測結果に委ねるしかない。

この高速度メーザー輝線は何を示唆するのか。22 GHz の水メーザーを VLBI のマッピング観測した結果、メーザー源の速度-位置関係はケプ

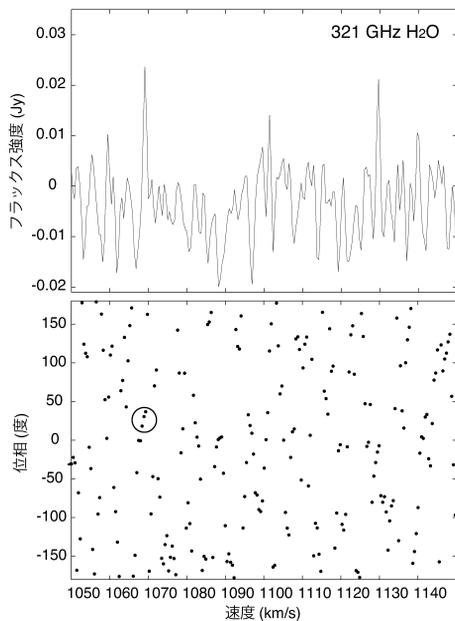


図4 321 GHz水メーザーの高速度成分のスペクトル。上段が振幅で下段が位相を表示する。V=1,069 km/sの速度成分付近の位相を○で囲った。

ラー回転運動曲線でモデルフィットできることがわかっている<sup>9)</sup>。ケプラー回転運動とは回転速度( $V_r$ )が回転中心からの距離( $r$ )の平方根に反比例する運動のことであり、数式で表すと $V_r \propto 1/\sqrt{r}$ の式に従う運動のことであり、このケプラー回転運動曲線を利用し、22 GHzと321 GHzのメーザーが同じ回転円盤上にあると仮定した場合、ある回転速度( $V_r$ )をもつメーザー源の円盤中心(AGNの中心エンジン)からの距離 $r$ が求まる。図4中の高速度成分の回転速度( $V_r$ =約635 km/s: 視線速度から系統速度を引いた値)を入れたら、 $r=0.018$ パーセクの値が算出される。この値は、Circinus銀河のブラックホール質量として別の方法で求めた $1.7 \times 10^6$ 太陽質量を採用すると、 $1.2 \times 10^5$ シュバルツシルト半径(ブラックホールの半径)に相当する。AGNの中心エンジンからわずか約0.02パーセク(ブラックホール半径の約10万倍)という距離で求めたメーザー

源は、AGNの中心エンジンからこれまで最も近傍で観測されたメーザーである。ちなみに、22 GHz帯の水メーザーは典型的に0.1-数パーセクの領域に分布することがVLBIによる観測で明らかにされている<sup>2)</sup>。

さて、サブミリ波帯の水メーザーはセンチ波帯のメーザーと異なる領域をトレースするのかという疑問は誰でも持つであろう。同じ領域を見ているのであればわざわざ観測が難しいサブミリ波帯で観測を進める必要はない。メーザー励起に必要な温度、密度、圧力などの諸条件は同分子のメーザーでも遷移が違うと異なるため、321 GHz帯メーザーは22 GHz帯のメーザーとは異なるガスの物理状態をトレースしていると思われる<sup>10)</sup>。例えば表1を見てみると、321 GHzの水メーザーは絶対温度で約1,860 K(温度換算で約1,580°C)という高エネルギーの励起状態にある、一方22 GHzのメーザーの励起エネルギーは約640 K(同約360°C)と低い。321 GHz帯メーザーが中心エンジンから本当に0.02パーセク近傍の位置で励起されているとしたら、われわれはAGNのより内部の高温領域を直接見る道具を得たことになるが、本当であろうか。遠方にある系外メーザーの空間分布の解明はALMAでは難しいので、321 GHz帯のサブミリ波VLBI観測で将来実証するのが近道だろう。

## 5. 関連研究へのインパクト

321 GHz帯水メーザーの系外銀河からの初検出は、今後の系外銀河の高密度分子ガスの研究にインパクトを与えるであろう。論文誌に本研究の掲載が決まった直後、海外の複数の研究者から筆者に問合せがあった。サブミリ波メーザーは、AGNの高密度分子ガスの研究者には未開拓ではあるが、将来の発展性を秘めた分野である。今後新たなサブミリ波メーザー探査に多くの研究者が興味をもつことになるだろう。

表1に示したとおり、サブミリ波帯の水メー

ザー輝線は例えば, 183 GHz, 325 GHz, 439 GHz, 658 GHz帯にも存在する. 183/325 GHz帯の水メーザーは, これらの周波数付近に大気中の水蒸気による吸収帯があり観測が難しい. 658 GHz帯水メーザーは振動励起状態にある水分子からの放射で高エネルギーの励起状態にある(表1). このような振動励起の水メーザーは晩期型の星に検出されているが<sup>10)</sup>, 系外銀河からは未検出である. 183 GHz/439 GHz帯の水メーザーはAGN(NGC 3079)からすでに検出されているが, メーザー源の分布は明らかになっていない<sup>11)</sup>.

サブミリ波帯の系外水メーザーの研究はALMAによる検出を目的とした観測研究から始まり, その性質を定量的に議論していく研究に発展していくと思われる. AGN中心部を取り巻くガスの力学構造のトレーサーとしては, 1ミリ秒角程度の空間分解能が必要になるので, ALMA単独ではわれわれが目指す研究は完結しない. ALMAを取り込んだサブミリ波帯での高感度なVLBI基線で多数の速度成分のメーザー源の位置を精密に測定することが可能になれば, AGN中心部の分子ガスの力学構造がサブパーセクスケールで解明されていくであろう. AGN中心部への分子ガスの移動がどのスケールで生じているか等々, AGN中心部のガスダイナミクスの解明がさらに進む期待もある. 系外サブミリ波メーザーの研究を発展させる夢は広がる.

## 謝辞

本稿を執筆する貴重な機会を与えてくださった国立天文台の伊王野大介氏, ならびに本誌編集委員の平松正顕氏にこの場を借りて一同厚く御礼を

申し上げます. またALMAの建設, 運用, 観測者支援にかかわってこられた多くの方々に感謝いたします.

## 参考文献

- 1) 例えば今井 裕, 2013, 天文月報106, 408
- 2) 例えば萩原喜昭, 2007, 天文月報100, 116
- 3) Herrnstein J. M., et al., 1999, Nature 400, 539
- 4) 廣田朋也, 2013, 天文月報106, 491
- 5) 例えば高妻真次郎, 2011, 天文月報104, 285
- 6) Greenhill L. J., et al., 2003, ApJ 582, L11
- 7) Gardner F. F., Whiteoak J. B., 1982, MNRAS 201, 13
- 8) Horiuchi S., et al., in preparation
- 9) Greenhill L. J., et al., 2003, ApJ 590, 162
- 10) Menten K. M., Young K., 1995, ApJ 450, L67
- 11) Humphreys E. M. L., et al., 2005, ApJ 634, L133

### A Search for Extragalactic Submillimeter Water Maser—A New Probe for the Circumnuclear region of AGN?

Yoshiaki HAGIWARA et al.

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

Abstract: We report the first detection of extragalactic water maser emission at the 321 GHz transition in the nearest active galactic nucleus (AGN) of Circinus galaxy using ALMA. Doppler velocity features of the maser straddle the systemic velocity of the galaxy, very similar to those of 22 GHz water maser in the galaxy. We also report the tentative detection of the highly red-shifted velocity features of the 321 GHz maser, which may indicate that the maser is originated from a Keplerian rotating disk model well-established in this galaxy. The 321 GHz maser may probe dense molecular material closest to the central engine of the galaxy.