

分子ガスレーザーと系外銀河

萩原 喜 昭

〈国立天文台スペース VLBI 推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yoshiaki.hagiwara@nao.ac.jp

銀河系内の星形成領域や晩期型星でよく観測される水酸基 (OH) や水 (H_2O) などの星間分子種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。このような現象はレーザー (Maser: Microwave amplification by stimulated emission of radiation) と呼ばれ、天の川銀河だけでなく系外銀河でも観測される。天体レーザーは輝度が非常に高く空間的に分解されにくいので (系外銀河中では見かけの大きさは非常に小さくなる)、VLBI (Very Long Baseline Interferometry) などの電波干渉計を使った高分解能観測の対象となってきた。系外の OH レーザーは赤外線銀河に選択的に付随し、その中心部から数十から百パーセクくらいの領域での高密度ガスの大局的な分布と速度構造をトレースすることが知られている。H₂O レーザーは高速回転する分子ガス円盤といったより微小な力学的構造を、活動的な銀河中心核から 1 パーセク程度以内の領域でトレースする。本文では、VLBI を利用した天体レーザー観測が系外銀河、特に活動銀河核周囲の研究に大きな威力を発揮している現況をまとめた。

1. はじめに

天体レーザーは星間空間のような物理的な極限状態で生じる現象である。レーザー (Microwave amplification by stimulated emission of radiation) はその名の由来どおり誘導放射 (stimulated emission) 過程を経て生じ、外的な作用がなくても生じる自然放射とは異なる。レーザーは可視域で生じるレーザー光のマイクロ波領域版である。星間分子が発見され始めた 1960 年代中頃に初めて、天体レーザーとして水酸基 (OH) レーザーが電離水素線 (HII) 領域に検出された¹⁾。以来、水 (H_2O)、一酸化ケイ素 (SiO)、メタノール (CH_3OH)、ホルムアルデヒド (H_2CO) などのレーザーが相次いで銀河系内外で見つかった²⁾⁻⁵⁾。一般に天体レーザーは銀河系内の大質量星形成が活発に起こっている領域や晩期型星に付随していることが多い。

現時点で系外銀河中でレーザーとして観測されている分子種は、OH、 H_2O 、 H_2CO の 3 種のみである。レーザーは、存在確率分布が反転した状態 (反転遷移: 低い準位より高い準位の存在確率分布が大きくなる) にある分子がエネルギー的に安定な低い準位に雪崩的に遷移する際に強力な電磁波を放出する現象である。このとき放出される電磁波の周波数は 2 準位間のエネルギーの差に対応して決まる。この反転遷移が起こる仕組み、いわゆる pump メカニズムの解明はレーザー現象の本質に迫るには避けては通れないにもかかわらず、最も早くから研究されている OH レーザーはおろか他の分子種の pump メカニズムもよく理解されていないのが現状である。Pump メカニズムとして、分子同士が互いにぶつかりあうことによって起こる衝突励起と、近傍や背後の電波源や赤外線源といった外部からの放射による放射励起の二

つが提案されている。また、衝突励起と放射励起の組合せも提案されている。レーザーを起こしている分子ガス領域のサイズは小さく、大きさは一般的に1天文単位 (1.5×10^{13} cm) 程度であるといわれているが、OHレーザーのサイズはH₂Oレーザーのそれより10倍程度大きいともいわれる。天体レーザーの特徴は、i) 放射強度が非常に大きく、放射領域が小さい。つまり輝度が非常に高い(ギラギラしている)、ii) 輝線速度幅が非常に狭い、iii) 輝線間の強度比が異常で熱平衡状態からかけ離れている、の三つが挙げられる⁶⁾。

2. 系外銀河中のレーザー

レーザーのpumpメカニズムは複雑で理論的にも十分理解されていない。レーザー現象のメカニズムを研究する理論家だけでなく、レーザーを天体中のダイナミカルな構造を探る道具として使う

のも有効ではないかと考える観測家もいる。レーザー源は輝度が非常に高く放射源の大きさが小さくて分解されにくいので、電波干渉計、特に超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometry, 以後略してVLBI) で、空間分解能を上げて観測されている。VLBIの手法では、同一天体からの信号を地理的に数百キロから数千キロ離れた数台以上の大/中口径の望遠鏡で独立に受信し、望遠鏡毎にデータを媒体に記録する。観測後、データを記録した媒体を1カ所に集め信号を再生してから2次元の像合成をする。その結果、1秒角の千分の1、つまり1ミリ秒角をきる解像度の電波像が合成される。VLBIは、クエーサー中のパーセクスケールジェットのエメージング観測などで、主に成果を上げてきた装置である。一方、VLBIの典型的な分解能1-10ミリ秒角は、近傍銀河中では 10^{16} - 10^{17} cm (0.01-0.1パーセク)程度に

表1 系外銀河から検出される分子ガスレーザーの性質をまとめた。OH, H₂O, H₂CO分子以外のレーザーが系外銀河から検出された例は現時点ではない。

レーザー分子	H ₂ CO (ホルムアルデヒド)	OH (水酸基)	H ₂ O (水)
プロトタイプ銀河	ARP 220	ARP 220	NGC4945, NGC4258
母銀河のタイプ	OH (右記) に同じ	大光度赤外線銀河, スターバースト銀河	活動銀河中心核 (AGN), 主に狭輝線 AGNs
周波数 (GHz)	4.829	1.667/1.665	22.235
レーザーが観測された銀河の数	3	およそ 100	およそ 75
典型的な距離 (Mpc)	70-100 Mpc	50-1,000 Mpc	10-100 Mpc
光度	太陽光度 100 倍程度	太陽光度の 100-10 ⁴ 倍	太陽光度の 100-2×10 ⁴ 倍
スペクトルの特徴	OH (右記) に同じ	線幅広く (典型的には 50-100 km/s 程度), 強度変動は小さい。	線幅狭く (典型的には 10 km/s 程度以下), 強度変動激しい, 大きくドップラー偏位して見える速度成分の存在。
Pump 源	近/遠赤外線	遠赤外線	AGN からの電波連続波
空間分布の特徴	ダストや近赤外線の分布と似ている	10-100 pc スケールで銀河核の周囲を取り巻くよう分布	2-3 pc 以下のコンパクト (円盤など) な領域に分布。或は, AGN のコアジェットに付随。

しかならず、メーザーの実際のサイズの千倍も大きい。したがって、個々のメーザー源をとらえているとは言い難く、分子雲中にあるメーザー源の集合体を観測しているのだと思われる。しかし天体中のメーザー源の分布を研究するならこの分解能でも十分である。実際に VLBI で測定した各々のメーザー源の相対位置と速度の分布により天体中のダイナミカルな構造を解析する研究スタイルが、VLBI による系外メーザー研究の代表的なアプローチである。このアプローチに沿って、VLBI による系外メーザーの観測は 80 年代から現在までなされている。メーザーの励起には温度や密度といった局所的な厳しい物理条件が必要なので(表 1)、星でも銀河でも中心により近い領域に観測されることが多い。

系外メーザーの特徴の一つとして、メーザーのフラックス強度から等方性を仮定して求めたメーザーの光度は、銀河系内の最強のメーザーに比べて桁違いに大きいことが挙げられる。銀河系内の OH メーザーの最大光度は 0.001 太陽光度程度であり、これと比較して系外 OH メーザーの光度は典型的に百万倍大きく 1,000 太陽光度を示すことから、メガメーザー (Megamaser) という呼称が付けられた。メガメーザーは系外の OH メーザーに付けられた呼称であるが、水メーザーに対しても使われるようになった。以下の章では、3 種の分子ガスメーザーがどういったタイプの系外銀河中の、どこに存在し、それがどのように解釈され、何が明らかにされてきたのかを紹介していく。表 1 に系外メーザー 3 種をその性質を比較できるように簡単にまとめておいた。参考にしていきたい。

3. OH メガメーザー

銀河系内外で最も早く検出された OH メーザー輝線は基底回転遷移で、周波数は 1,667 MHz と 1,665 MHz (波長で 18 cm) である。4.7 GHz と 6.0 GHz 帯の回転遷移も見つかっているが銀

河系外での観測例はまだあまりない。OH メーザーが最初に発見されたのは、NGC253 という南天の渦巻き銀河で、70 年代の前半であった⁸⁾。この OH メーザーの光度は 1 太陽光度程であり銀河系内の OH メーザーの千倍位の光度なので、メガメーザーと区別してキロメーザー (kilomaser) と呼ぶこともある。メガメーザー最初の発見は 80 年代の前半で、Arp220 (IC4553) という赤外線で非常に明るい合体銀河中にであった⁷⁾。それ以後、OH メガメーザーの発見が相次ぎ、現在までおよそ 75 銀河にメガメーザーが見つかっている。キロメーザーを入れれば、系外 OH メーザーの総数は 100 天体を超える。これまで発見された OH メガメーザーの最大光度はおよそ 4,000 太陽光度である。この OH メガメーザーの大光度は、銀河系内にある OH メーザーとは本質的に異なる pump メカニズムに起因するのではないかと考えられてきた。

その後研究が進み、多くの OH メガメーザーはある種の赤外線大光度銀河中にあることがわかった。さらにメーザーの光度と遠赤外線の光度には強い相関があること、遠赤外線から求めたダストの温度との相関が明らかになる。以上は OH/IR 星の OH メーザー (1,667/1,665 MHz) の pump が遠赤外線放射によると理解されていることと矛盾はしない。今日では OH メガメーザーの pump メカニズムは定性的ながら、銀河中心核領域で生じる活発な星形成に伴い暖められたダストから放射される遠赤外線であると理解されている。以下に VLBI で詳細にマッピングされた OH メガメーザーの例を二つ挙げる。

Arp220 (距離: $D=75$ Mpc, ただし $H=75$ km/s/Mpc を採用, 以後同じ) は大光度赤外線銀河である。赤外線だけの明るさで太陽光度の 10^{12} 倍という莫大な値に達する。その巨大光度を説明するために、銀河同士の衝突/合体が誘発するスターバーストと活動銀河核 (AGN: Active Galactic Nucleus) の両方の寄与が考えられている。Arp

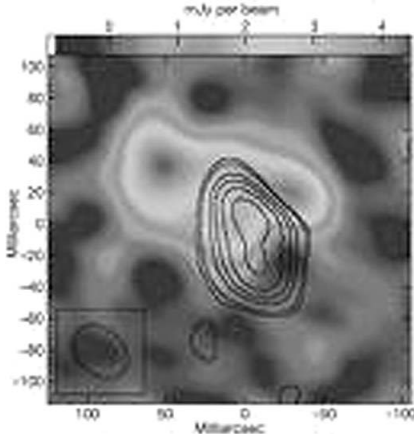


図1 Mrk231の中心核を取り巻くOHメガメーザーの分布をVLBIで撮像した結果(図はH.-R.Kloekner氏提供, および文献25. 横/縦軸のスケールはミリ秒で, 1ミリ秒は約0.83パーセクに相当する. 電波で観測された銀河の中心核(等高線で示した)の一部を取り囲むようにメーザー(白黒スケールで表示)が分布しているのがわかる.

220をVLBIの20ミリ秒程度の分解能で観測すると星形成に伴う超新星(RSNe: Radio Supernovae)起源の電波連続波がおよそ50パーセクの範囲にわたって見える. 一方, メーザーはそのRSNeの集団の近傍に200-300パーセクに広がった群と, 2-3パーセクの領域に局在する二つの異なった群に区別されて観測されることがわかった¹⁰⁾. 後者のメーザー群はRSNeによるショックに誘因され生じた衝突励起なのかあるいは銀河内の強い赤外線による放射励起なのかはよくわかっていない. しかし, OHメガメーザーが銀河中のコンパクトな領域とやや広がった領域の両方をトレースしている事実は興味深い.

Mrk231 ($D=172$ Mpc) は中心に1型セイファートタイプの核をもつ全天で最も明るい赤外線銀河として知られ, OHメガメーザーや酸化炭素(CO)などの他の分子が豊富に観測される. VLBIで分解された電波像を見ると電波連続波の中心核成分を取り囲むようにOHのエミッションが分

布している(図1参照). その分布は連続波の軸を横切るように取り巻くトーラス状に見え, 軸とは全く一致しない方向に弱い速度勾配が見える. モデルによれば, 連続波の軸の周りに回転するトーラスの姿をメーザーがとらえており, トーラスの半径は65 pc, 厚みが70 pcとなる¹¹⁾. Mrk231では, メーザーが中心核からの寄与と思われる電波連続波の放射を増幅していると思われる. 上記2例にとどまらず, OHメガメーザーは銀河中心核から100パーセク程度離れた領域の分子ガスの大局的速度構造をトレースしていることがこれまでのVLBIによる高分解能観測で明らかになっている.

4. H₂Oメガメーザー

系外の水メーザーの最初の発見は1976年で, Local GroupにあるM33 ($D=800$ kpc) からであった. 不思議なことにメーザーはM33の中心部ではなく, 銀河の渦巻腕上からであった¹²⁾. 後のVLBI観測によれば, メーザー自体はHII領域に付随しており, その光度は銀河系内のオリオン水メーザーに比して10倍程度しか変わらない¹³⁾. また, 銀河系の大質量星形成領域W49Nにある銀河系最強の水メーザーの光度(およそ1太陽光度)より小さい. つまり星形成活動で説明可能な‘通常の’メーザーである. ところが, この発見の翌年にNGC4945 ($D=3.2$ Mpc) という南天の円盤銀河にも水メーザーが発見された¹⁴⁾. その水メーザーの光度は100太陽光度を超え, W49Nの水メーザーの光度の約100倍大きい. 前年に見つかったM33の水メーザーに比べ1,000倍以上明るく, これが水‘メガメーザー’のプロトタイプとなる. このあと1986年までにNGC4258, NGC3079, NGC1068といった近傍のセイファート銀河に同じく100太陽光度の程度の水メガメーザーが発見される. このような水メーザーの起源を明かす努力が続いた. 水メガメーザースペクトルの特徴として, メーザー輝線の視線速度幅が狭

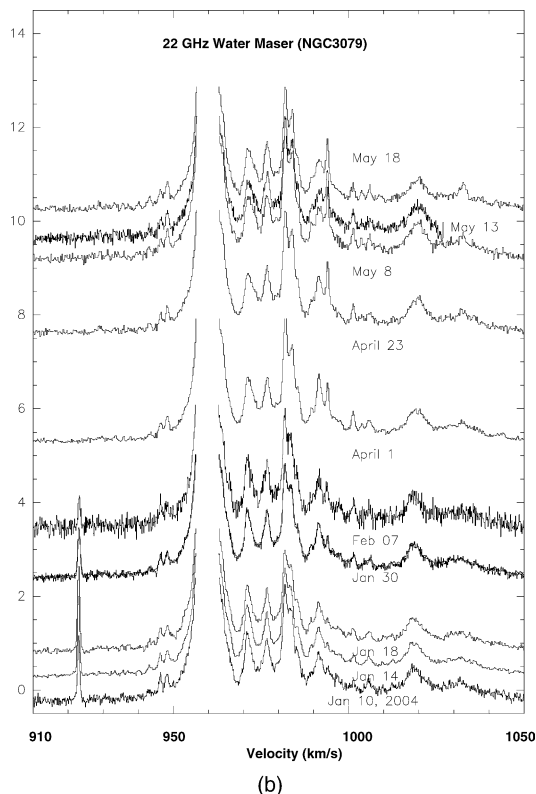
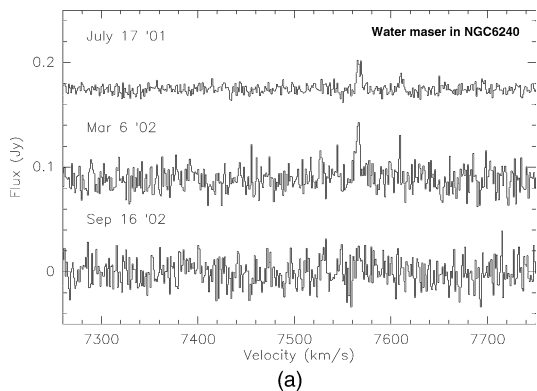


図2 (a) 合体銀河 NGC6240 の 22.2 GHz 水メーザースペクトルを3回にわたって連続観測した結果。半年の間にエミッションが全く見えなくなってしまうほど、水メーザーの強度は変動が激しい。筆者が2001–2002年にドイツマックスプランク研究所 (MPIfR) 100-m 電波望遠鏡で観測した結果である²⁴⁾。(b) 代表的な水メーザー (活動銀河 NGC3079) の顕著な強度変化の一例 (半年弱の間に数回観測したデータ)。MPIfR 100-m 鏡で、W. Sherwood 氏と筆者が2004年に観測した。横は速度軸、縦は電波フラックス強度。スペクトル間の縦の間隔は時間に対応する。

く 10 キロ毎秒以下、強度の変動が短期間で非常に激しい (図2)、など OH メーザーとは対照的である。さて、1980 年代初頭から運用を本格開始した米国国立電波天文台の Very Large Array (VLA) をもってしても水メガメーザーの分布を空間的に分解できなかった。VLA で観測したグループによれば、メーザーは銀河中心核から数パーセク以内にある高密度分子ガスから出ているという¹⁵⁾。しかし強力なメーザーと AGN の活動性を明確に関連づけた解釈はこの時点ではされていなかった。一方で銀河系の星形成領域で観測される W49 タイプの星形成活動に付随するメーザーを多数集めても、NGC4258 にあるような水メガメーザーの巨大な光度は説明できない。この後しばらく、新たな水メガメーザーの発見はなく、メーザーのスペクトルをモニターして強度変動と速度変化を測定する観測などが地道に行われていた。そして1992年、観測天文学史上に残る美しいメーザースペクトルの検出が1992年に国立天文台野辺山の研究者によってなされた。地道な強度モニター観測中、すでに知られる NGC4258 (M106, $D=7.2$ Mpc) の水メーザースペクトルに、銀河の系統速度に対して最大およそ 1,000 キロメートル毎秒もドップラシフトしたメーザーの速度成分が野辺山 45 m 電波望遠鏡で検出された。銀河の系統速度に一致するメーザー成分を挟んでドップラシフトしたメーザー成分がほぼ左右対称に分布して

いることから、銀河内部にある高速回転ガス円盤を水メーザーがトレースしている証拠ではないかとされた (図3)¹⁶⁾。この解釈は正しく、最大で 8,000 キロメートル離れた位置に展開する 10 台の 25 m 望遠鏡からなる VLBA (Very Long Baseline Array) による VLBI 撮像観測で実証された¹⁷⁾。VLBA が分解したメーザー源をプロットし

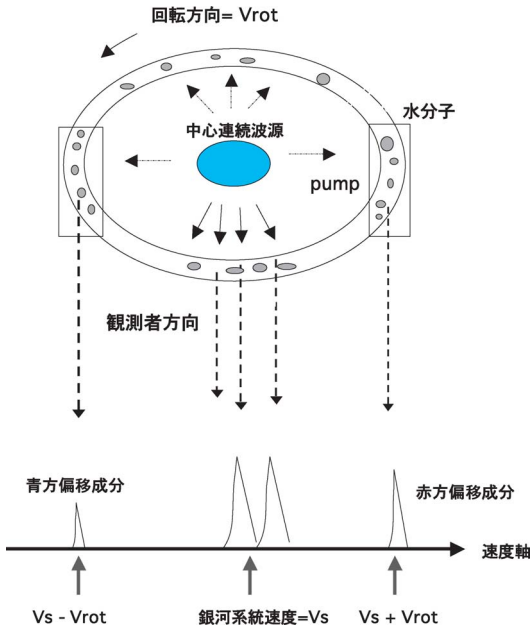


図3 一部の系外銀河から観測されるメーザースペクトルを回転円盤モデルを仮定して模式的に説明した。 V_{rot} は円盤の回転速度である。速度が赤方偏移したメーザ成分は銀河の系統速度 V_s (観測者から遠ざかる向き) に V_{rot} を加えた速度に出てくる。メーザ放射は電波源とメーザ円盤 (ほぼ横向き) と観測者の視線方向とが重なったとき、一番強く見える。回転円盤の手前と反対側にあるメーザが観測された例は今のところ報告されていない。

たところ、メーザは内径4ミリ秒、外径8ミリ秒 (前者は0.14、後者は0.28パーセクに相当) の薄い円盤状に分布しており、観測者はそれをほぼ真横から見ているということがわかった。さらに、多数のメーザ源の位置-速度分布から、メーザはケプラー回転運動 (速度が距離の平方根に反比例する回転運動; $v^2 \propto r^{-1}$) をしていることがわかった^{17), 18)}。円盤内径とその回転速度から、円盤内側に太陽質量のおよそ350万倍のブラックホールがあると簡単に計算できる。円盤内側は密度にすると1立方パーセク当たり太陽質量の 10^9 倍を超え、これまでに知られる最も密度が高い星

団の密度の1万倍を超える値だ。これほど密度の高い星団は、星同士の重力相互作用により、銀河年齢より十分短いタイムスケールで蒸発して消滅してしまう。以上の理由から、NGC4258の回転円盤内側の質量の正体は、星団ではなく、超巨大ブラックホールだと理解されている。NGC4258の研究成果は国立天文台の研究者たちがリードして上げた成果である。NGC4258に関しては、和文の解説が数多く出ているうえ、本誌にも過去掲載された¹⁸⁾。したがって、ここではこれ以上詳しく立ち入らない。

さて、この薄い円盤状構造の存在はNGC4258に固有ではなく、その他の水メーザ銀河にも存在する事実がその後のVLBI観測で明らかになった。水メーザの起源はAGNの活動性、つまりAGNを構成するコア、ジェットからの電波連続波を増幅した結果、桁違いの明るさのメーザ放射が生じることが確認された。よってこの種の系外水メーザを、M33などの星形成起源の水メーザと区別するためにnuclear (核) 水メーザと呼ぶ研究者もいる。VLBIによる高空間分解能観測から、nuclear水メーザはNGC4258タイプの円盤状に分布するメーザのほか、電波ジェットと重なるように分布する例、アウトフローのような形状の分布もある。また、中心核付近に複雑な分布を示し、解釈がつかない例もある。いずれにせよ重要な事実は、nuclear水メーザの分布はほとんどの場合1パーセクくらいまで分解されないということである。これが、他の系外メーザとは異なり、nuclear水メーザの特徴である。逆にいえば、水メーザは活動銀河核中心から0.1パーセクスケールの構造を直接測ることを可能にする現在唯一のプロープといえよう。

1995年以降、NGC4258タイプのnuclear水メーザ検出を狙った単一鏡サーベイ観測が世界各地でなされた。筆者もこれに便乗し、野辺山45m鏡での新たな水メーザ探査に1996から2年

間部分的に参加させていただいた。しかしこのときの新検出の水メーザーは1天体だけであった²⁰⁾。現在までに1,000以上の銀河が観測されたが、現時点でのnuclear水メーザーの総数は75程度である。水メーザー探査には忍耐が要る。さらに、一番遠いnuclear水メーザーは赤方偏移が0.66という距離にあるクエーサーに存在する。メーザーの明るさはおよそ20,000太陽光度にも達する²¹⁾。このメーザーに対して早速VLBIの観測がなされており、結果を見るのが待ち遠しい。

5. H₂CO メガメーザー

4.8 GHz (波長 6 cm) のホルムアルデヒド (H₂CO) メーザーが見える天体および領域は銀河系内外併せても現在まで十数領域でしか報告されていない。系外銀河ではOHメガメーザーのArp 220などの赤外線銀河の数天体からしか検出されておらず、むしろ吸収線として観測される傾向がある。また、ホルムアルデヒドメーザーが見える銀河はOHメガメーザーも存在する。メーザーのフラックス強度は、OHメガメーザーに比べ1桁以上弱く、数ミリジャンスキー程度である。Pumpメカニズムは、おそらく遠/近赤外線ではないかとされている。VLAで観測すると、Arp220のホルムアルデヒド分布はハッブル望遠鏡がとらえた近赤外線のエミッションの分布をなぞるように見え、さらにOHメーザーと同じくダブルピークをもつコンパクトな構造の周囲にも分布している。ホルムアルデヒドメガメーザーは水メガメーザーとは異なり、活動銀河の中心部付近ではなくスターバースト核や近遠赤外線放射領域の比較的広がった領域に分布していると思われる。まだ個体数が少ないのでその性質の統一的な解釈は不可能だが、ホルムアルデヒドメガメーザーはOHメガメーザーの分布に類似しているのではないか。

6. 天体の距離指標として

おそらく、初めて天体メーザーを観測した人

は、天文学の現在過去未来の課題である距離の精密決定にメーザーを利用できるとは考えてはいなかったであろうと思われる。しかし、数ミリ秒角の分解能でもコンパクトな系外のメーザー源は近傍の“宇宙空間の灯台”として有効である。セファイド型変光星を利用した距離決定法以外に、高精度の距離決定の方法の開発は必要である。20年以上も前、GenzelらはオリオンやW51の星形成領域の水メーザーの固有運動の発見をした後、メーザーが出ている領域までの距離を計算した²²⁾。原理は簡単な幾何学だ。距離 D にある天体の角距離を θ とすると、天体の大きさ L は $L = D\theta$ (天体は皆地球から遠方なので、 $\theta \ll 1$) と表される。両辺を時間で微分すれば、 $D = 206 \times V$ (キロメートル毎秒)/ ω (マイクロ秒毎年) (kpc), ($V = dl/dt$, $d\theta/dt$ は角速度 ω) と求められる⁶⁾。 V はメーザー源の直進運動速度、 ω はVLBIによるメーザーの固有運動の測定値に相当し、マイクロ秒のオーダーで測定可能である。この方法では天体が遠くなればなるほど、見かけの固有運動値は小さくなり、測定が困難になる。現在のVLBI技術は好観測条件下で10マイクロ秒台の測定精度を可能にしている。VLBAを利用して渦巻銀河M33の水メーザーを5年間観測してメーザーの固有運動を測定したところ、直線運動速度が106キロ毎秒の水メーザー源が示す固有運動値はおよそ30マイクロ秒毎年であると測定された²³⁾。この値を上式に代入すれば、M33までの距離 D は大体730キロパーセクと求まる。可視光によりセファイド型変光星から求めたM33の距離の値は約800キロパーセクである。全く独立な二つの方法で求めたM33への距離の値はかなり近い。ただし、この方法ではメーザーの固有運動値がマイクロ秒台を下回るより遠方銀河の測定は困難になる。近傍の銀河でもメーザー自体が観測されていない銀河、例えばM31 (アンドロメダ銀河)、に対してはこの測定法はもちろん適用できない。

7. おわりに

銀河系内の OH, H₂O メーザーがよく観測され始めた 25 年くらい前に、系外銀河のメーザー観測が活動銀河研究の一分野を開拓すると予感できた人はおそらくいなかったであろう。天体メーザーの pump メカニズムを理論的に完全理解するのは困難であるが、メーザーを天体の微小構造のトレーサーとして活かす観測的研究がなされてきた。

謝 辞

国立天文台の出口修至氏には本文を改訂する上でたいへん貴重なコメントをいただきました。W. Sherwood 氏には本文中の図を提供していただいたことにお礼を申し上げます。最後に、本稿を出版にまで漕ぎ着けるうえで校正作業に辛抱強く取り組んでいただいた編集部の斎藤正雄氏にこの場をお借りして深くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Weaver H., et al., 1965, Nature 208, 29
- 2) Cheung A. C., et al., 1969, Nature 221, 626
- 3) Snyder L. E., Buhl D., 1974, ApJ 189, L31
- 4) Barrett A. H., et al., 1971, ApJ 168, L101
- 5) Downes D., Wilson T. L., 1974, ApJ 191, L77
- 6) Elitzur M., 1992, Astronomical Masers, Kluwer Academic Publishers
- 7) Baan W. A., et al., 1982, ApJ 260, L49
- 8) Whiteoak J. B., Gardner F. F., 1973, Astrophys. Lett. 15, 211
- 9) Baan W. A., 1989, ApJ 338, 804
- 10) Lonsdale C. J., et al., 1998, ApJ 493, L13
- 11) Kloeckner H.-R., Baan W. A., Garrett M., 2003, Nature 421, 821
- 12) Churchwell E., et al., 1977, A&A 54, 969
- 13) Greenhill L. J., et al., 1993, ApJ 406, 482
- 14) Dos Santos P. M., Lepine J. R. D., 1979, Nature 278, 34
- 15) Claussen M. J., Lo K. Y., 1986, ApJ 308, 592
- 16) Nakai N., Inoue M., Miyoshi M., 1993, Nature 361, 45

- 17) Miyoshi M., et al., 1995, Nature 373, 127
- 18) 中井直正, 1995, 天文月報 88, 285
- 19) Baan W. A., et al., 1993, ApJ 415, 140
- 20) Hagiwara Y., et al. 1997, PASJ 49, 171
- 21) Barvainis R., Antonucci R., 2005, ApJ 628, L89
- 22) Genzel R., et al., 1981, ApJ 244, 884
- 23) Brunthaler A., et al., 2005, Science 307, 1440
- 24) Hagiwara Y., et al., 2001, A&A, 383, 65
- 25) Kloeckner H.-R., Baan W. A., Garrett M. A., 2003, Nature 421, 821

Extragalactic Masers

Yoshiaki HAGIWARA

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

Abstract: The acronym ‘Maser’ has the definition ‘Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation.’ Astronomical masers have been observed mostly in the prominent sites of star-formation and evolved stars in the Milky Way. Molecules such as hydroxyl (OH), methanol (CH₃OH), and water (H₂O) are known to emit intense maser emission in the interstellar space, the site of many ultimate physical conditions.

OH, H₂O, and H₂CO masers are observed in distant extra-galactic sources, as well as in the Milky Way. These extra-galactic masers are observed very luminous and compact. Very Long Baseline Interferometry (VLBI) with the angular resolution of less than 0.001 arc second is one of the most important tools for the study of the angular structure, distribution, and kinematics of these masers.

VLBI observations have proved that extra-galactic masers are powerful tools for understanding the activity and dynamics within central few parsecs of active galaxies. In this short article, the current status of studies of extra-galactic masers is briefly reported.