

VERAによる宇宙メーザー励起機構の研究

今井 裕

〈鹿児島大学大学院理工学研究科物理・宇宙専攻 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-35〉
e-mail: hiroimai@sci.kagoshima-u.ac.jp



VERAによる水 (H_2O), 一酸化ケイ素 (SiO), メタノール (CH_3OH) メーザー放射源の観測では、それらを点源群として扱い天体位置の指標とみなすことで、天の川銀河全体の構造や運動、ならびに、メーザー天体内部の三次元速度場を把握する。そしてこの手法は、ある程度の成功を収めている。一方、これら宇宙メーザー放射そのものの発生原理やそれが意味する物理的性質の理解は果たしてどこまで進んだのだろうか？ 本論では、VERA単独およびVERAとの連携VLBI観測を通して理解されてきた、宇宙メーザー源の性質について概観する。

1. はじめに

私がVLBI（超長基線電波干渉法）の手法を用いた宇宙メーザー源の研究を始めてちょうど20年が経とうとしつつある。VLBI観測は今でも手間暇がかかるが、そんな観測を1990年代後半に連続で実行し「電波像動画」にしてしまった米国VLBI専用観測網（VLBA）を用いたメーザー源研究に対しての衝撃は、今でも忘れられない（それについては最終報告論文¹⁾を参照）。そういうVLBI連続観測の実現を夢見て、国内でVERAが完成したら新たに自らどんな研究ができるのか、10年後の実現になるかもしれない研究計画をいろいろ練ったものである。VERAが2002年に完成すると、メーザー源年周視差計測に基づく研究に着手したが、本当に10年経過してしまった2008年頃、当初のアイデアをそろそろ実現させねばと思い立ち、現在それに向けていろいろと準備を進めているところである。

本論では、他の記事で扱う年周視差計測とは別に、それ以前から温めてきた宇宙メーザー“そのもの”の探求に絞ったVERAを使った観測について取り上げる。私自身が関わったものだけでな

く、関連した研究についても合わせて紹介する。

1.1 位置指標としての宇宙メーザー源

宇宙メーザーは、特殊な物理条件や運動を伴ったガス塊のもとでしか、励起されかつ観測者の方向に増幅されない。これらから、メーザーに関する二つの物理的性質や研究上の特長へと帰結する。

その一つは、宇宙メーザー源が多数のコンパクトな「スポット」の集団として観測されることである。1カ所からのメーザー放射が著しく増幅されるドップラー速度の範囲が 1 km s^{-1} 程度に限られるので、星間ガス雲中でその程度で視線速度のばらつきが見られる範囲にスポットサイズが限られる。典型的には1天文単位（AU）くらいで、地球から1 kpc（約3,260光年）も離れるとわずか1ミリ秒角（ $1/3,600,000$ 度）程度の視直径にしかならない。一方、音速で物理状態変化が広がっても、その程度の範囲まで波及するのに1年程度かかる。従って、個々のメーザースポットの寿命は、数桁にわたってばらばらではあるが、典型的には1年程度となる。この期間に限ってではあるが、位置指標としてこのようなメーザースポットを利用することができる。このことが、一連の

VERAによるメーザー源測定の拠り所となっている。それらについては別記事を参考にされたい²⁾。

1.2 宇宙メーザーの物理を探究する

もう一つの宇宙メーザーの性質・特長は、先述した特殊な条件を伴った特殊な進化段階の天体のみメーザー源が付随することである。このような天体の中には、解説は省略するが「惑星誕生から宇宙論まで」と言っても決して過言ではないほどに、天文学の大テーマに深くかかわるものもある。天の川銀河内のものに限ると、星が生まれて間もない段階（大質量星については、OB星落の寿命1,000万年程度に対して最初の10万年未満³⁾）や、星が終末を迎えて長周期の脈動変光を繰り返しつつ激しい質量放出を伴う段階（漸近巨星枝星段階中最後の1/10未満の期間ならば10万年未満）で、メーザーが観測される。しかし、このような特殊な環境でしかメーザーが見られないのにもかかわらず、メーザー源の多様性が見られる。この多様性の起源を理解するための研究は、付随天体の「進化」という面と「質量」という面を持った立体パズルを解くような複雑な様相をなしている。

同じメーザー源に対して通常2-3カ月の間隔で2-3回VLBI観測を実行すれば、個々のメーザースポットの位置変化（固有運動）を測定でき、そこからスポット群が付随する上記天体を取り巻くガス雲の三次元運動が把握できる。天文月報記事でも過去何度か紹介された手法である⁴⁾。しかしこれらの情報だけでは、そのメーザーがなぜそこで励起されて観測者に向かって増幅されるのかを理解するには不十分である。そこで、宇宙メーザーの物理（励起機構）そのものの探求を目指して、さらなる観測上の工夫が必要となる。

VERA、そして大学連携VLBI網（JVN）の登場により、このような工夫を凝らした観測を実行する機会がもたらされ、メーザーを励起する天体そのものの理解に大きく貢献してきたと言える。以降本論では、この部分に焦点を当てる。

2. メーザー励起機構について

次章以降の話を読者に理解していただくために、難解な宇宙メーザーの話のうち、話の要点に関わる部分についてここで述べておく。宇宙メーザーの物理を語る際、a) 励起（エネルギー準位間の分子数分布の反転）、b) 励起のためのエネルギー源、そしてc) 指向性を伴う増幅の話がポイントとなる（詳細は教科書^{5), 6)}を参考のこと）。

メーザーの分子種によって細部は異なるが、メーザーが観測されるガス雲の温度は100-3,000 Kの範囲である。励起に必要なエネルギーを獲得したガス塊が、星間空間ではこの温度範囲で分子ガスとして存在することができるということになる。ガス塊の密度が上がり過ぎて（これも分子種によるが、水素分子個数密度で 10^{11} cm^{-3} 以上）分子数分布の反転が消えない限り、そして、視線速度が揃い同じドップラー周波数を持ったメーザー光子をもたらす領域が続く限り、メーザーはどこまでも増幅される。ただし、増幅路が短い間はその長さに対して指数関数的に強度が増す（不飽和増幅）のに対し、増幅路がある程度以上長くなるとその長さに比例して強度を増す（飽和増幅）。同じ増幅路長の変化に対して、前者の場合は著しい強度変化を伴う。後述する天の川銀河内にあるメーザー源の激しい時間変化は、不飽和増幅を反映したものだだろう。スペクトルの形状も、前者ではガス塊内の熱的運動による線幅よりも細くなり、スポットサイズも小さく見えるようになる。これらの増幅に関する要素は、メーザーを励起するガス塊の形に依存する⁷⁾ので、メーザー輝度分布を直接撮像できればメーザーガス塊そのものの構造についてある程度推定できるはずである。

エネルギー準位間分子数分布の反転が実現するか否かは、メーザー遷移の上位準位への分子の供給（ポンピング）と下位準位からの引き去り

(ルージング)のバランスで決まる。レーザーとして定常的に観測されるためには、一定期間ポンピングの条件が整い、それに必要なエネルギーが供給され、レーザー放射した分子が速やかに下位レーザー準位以外の準位へと遷移されなければならない。ルージングは、飽和-不飽和増幅の条件を決める主要因となっているが、これ以上詳細には触れない。レーザー励起機構について専ら議論になるのは、ポンピングの方である。そのエネルギーとしては、レーザー天体中の中心星からの赤外線放射そのものあるいは加熱されたガス塊からの赤外線再放射(放射励起)、または、ガス塊の運動エネルギーが他のガス塊との相互作用によって分子運動に転化される際に分子同士との衝突を通して獲得するもの(衝突励起)が考えられる。

VLBI観測によってレーザースポットのスペクトルと二次元輝度分布の形状を明らかにし、VLBI以外の観測によってスポット周辺の物理環境を明らかにすれば、宇宙レーザーの励起機構が解明できるはずである。しかし実際はそう簡単ではなく、検証観測の実施自体も容易ではない。VLBI以外の装置では、レーザースポットのスケールに対応する細かさでは撮像ができない。一方、限られた望遠鏡数では、VLBIといえどもスポットの一部の構造しかとらえられない。また、レーザー源は赤外線源でもありガス流(放出流=アウトフローや物質降着流)源でもあり、これらエネルギー源は物理的に接しているので、放射励起か衝突励起かの区別が容易ではない。実際、同じメタノール(CH₃OH)分子からのレーザーなのに放射励起・衝突励起を示唆するレーザー輝線が同じ天体/進化段階に共存するし、同一レーザー輝線でも時期によって励起機構が切り替わるかもしれない。図1では、後述する一酸化ケイ素(SiO)レーザーを説明するエネルギー準位図を示しているが、実際観測される天体では異なるレーザー輝線がほぼ同じ強度で光っている(一つの温度を有する環境では説明ができない)。結局、

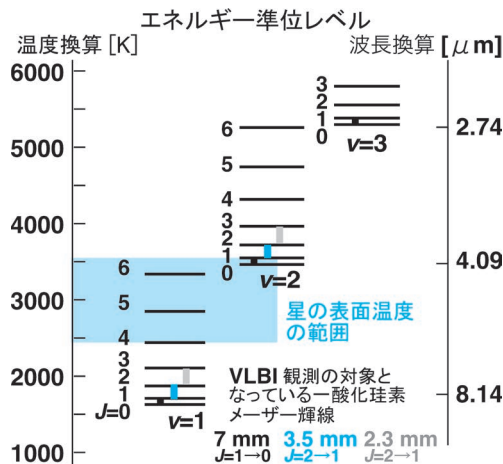


図1 一酸化ケイ素(SiO)分子の振動および回転エネルギー準位を表すエネルギーレベル図。J=k+1→k(k=1, 2, 3, …)の回転励起状態の遷移が分子輝線として観測され、一部がレーザー増幅を伴っていることが確認されている。普通の熱的放射ならば、レーザー放射を行う分子が属するガス塊の温度に対応するエネルギーまで多くの分子が励起される。一酸化ケイ素レーザーでは、異なる振動励起状態(v)からのレーザー輝線がほぼ同じ強度を持つという異常性についての議論が繰り返されてきた。本論では²⁸Si¹⁶Oについてのみ言及しているが、同位体²⁹Si¹⁶Oからのレーザー放射も確認されている。

多くの科学実験と同様に、二つ以上の現象を同時に観測し、片方の現象の観測期間における振る舞いをチェックしつつもう片方の振る舞いを精査する、という手法をとらなければならない。宇宙レーザー研究の場合、予測される不飽和増幅-飽和増幅間、放射励起-衝突励起間の共通点と相違点を、何らかの手法で同時に検出し調べることになる。

3. VERA/JVNを用いた単一望遠鏡モニターおよびVLBI撮像観測

VERAやJVNでは2013年現在、周波数6.7 GHzのメタノール、22.2 GHzの水、43.1 GHzおよび42.8 GHzの一酸化ケイ素レーザーの観測が

精力的に進められている。以下主に取り上げたいのは、レーザー強度の時間変化追跡と、過去に撮像例がないレーザー輝線に対する初めてのVLBI撮像に関するものである。

3.1 メタノール (CH₃OH) レーザー

メタノールは、6.7 GHz以上の周波数で多くのレーザー輝線を形成する。衝突/放射励起どちらが優勢かによってクラスI, IIレーザーに分類されている⁶⁾。どちらも生まれて間もない大質量星に付随するが、専らVLBI観測の対象になるのは後者のほうで、しばらくこちらに焦点を当てる。

このレーザー、特に6.7および12.2 GHzのものは、多くのレーザー源におけるスポット群分布の様子から、その大部分は生まれたばかりの大質量星が形成してきた降着ガス円盤に付随するものと示唆されている^{8), 9)}。このことから、若い大質量星へのガス降着の仕組みを解明する手がかりを与えることが期待されてきた。ただ、中心星からはるか数百AU以上も離れたところにあるガス塊の運動を計測しただけでは、星に向かって降着していくガスの運動そのものが見られるわけではない。

一方、放射励起されるこのレーザーの強度変化がどうやら中心星の挙動(=光度変化)そのものを反映している、という示唆が与えられるようになってきた。個々のクラスIIメタノールレーザースポットの寿命は数年以上にも達し、このレーザーが付随する領域は比較的力学的に安定しているらしい。しかしそれでも、激しい強度変化を伴っていることが確認されてきた。その一つの代表例は、周期的変動である¹⁰⁾。確認されている周期は100-500日で、生まれたての星であるのにもかかわらず後述の進化末期の長周期変光星の挙動に似ている。もし実際にそうだったら、恒星物理学上重要な知見を得ることになるが、連星系における食の効果ではないかという見方もある¹⁰⁾。

山口大学を中心としたグループは、1年のうち3か月だけではあるが、ほぼ毎日山口32 m望遠鏡で

メタノールレーザーの強度モニター観測を実行している。その上で、強度変化する個々のスペクトルピークが帰属するレーザースポットの相対位置を把握するために、VERAも含むJVN観測を実行してきた。数日スケールのレーザー強度変化を調べると、近くにある複数のスポット群の間で増光/減衰の傾向はそろっているのに対し、遠く離れたスポット群間ではそれが反転していたり時間差を伴うことがわかった。中心星からの放射がレーザー領域におけるダストからの赤外線再放射の強弱を制御し、レーザー励起がこの再放射によって制御されているらしい。この仮説をもとに、上記のようなレーザー強度の変化を中心星からの距離の違いによって説明できることが示された¹¹⁾。

さらに、このような系統的なレーザースポット強度変化の中で、特に2, 3日以内の急激な増光とその後数日スケールでのなだらかな減光は、視線速度や方向が特定の狭い範囲にあるスポット群でのみ繰り返し見られるという現象が見つかった¹²⁾。その場所付近にレーザー励起のエネルギー源である星本体が存在するのだろう。こういうレーザースポットでのみその強度変化が薄められずに星(あるいは連星系の)短時間変動が忠実に反映されているのかもしれない。水とともに、メタノールのレーザー源は大質量星形成の初期段階に付随している期待が高まっている。このことも考慮すると、メタノールレーザースポットの強度変化を手がかりとした、ガス降着を依然伴う若い大質量星の成長を見届けることが可能になるかもしれない。さらなるスポット群の固有運動と強度変化の詳細な分析は、レーザースポット群が付随する降着ガス円盤中の立体構造および三次元速度場を明らかにするだろう。少なくとも、質量降着率とアウトフローの成長履歴のより正確な推定が可能になると期待される。

ちなみに最近、クラスIメタノールレーザーでも44 GHzにあるレーザー輝線のVLBI撮像が成功したそうである¹³⁾。ここではこれ以上解説し

ないが、このメーザー輝線が、それが付随する生まれたての星からのアウトフローの進化を解明する重要なプローブとなりうるのか、今後の研究の進展を見届けたい。

3.2 水 (H₂O) メーザー

22.2 GHzの水メーザーは、宇宙メーザーの中で最も明るい。赤外線星からの放射光子だけではこの明るさを稼ぐだけの個数に対応する水分子を励起できないことから、早くから衝突励起によるものと理解されている⁵⁾。実際星形成領域では、生まれたばかりの星からのアウトフローが周辺ガス雲と衝突する現場で、水メーザーが見られる。

一方、アウトフローの衝突部でも見られるのであれば、降着流と星周ガス円盤がぶつかる場所でもメーザーが見えるかもしれない¹⁴⁾。しかし、降着流が原因とみなせる現象を直接とらえるところにはまだ至っていない^{15), 16)}。スポットの寿命が短過ぎてその固有運動を追跡できないのと、メーザー増光時に降着流に付随するスポット群が出現するとは限らないからである。そこで以降、生まれたばかりの星と進化末期の長周期脈動（ミラ型）変光星に付随するアウトフローに付随する水メーザーに話の的を絞る。

メーザースポット群の三次元運動（視線速度＋固有運動）をただ漠然と眺めているだけでは、アウトフローの発生源である星の位置を確定できるだけにとどまる。しかしある天体でさらに詳しく見ると、同じ方向に動いているスポット群の一部がその隣の部分よりも速く移動している様子が捉えられた¹⁷⁾。視線速度の情報だけでは、同じ視線方向上の全く異なる場所での全く異なる運動を見ている場合と区別がつかない。しかし本例では、スポット群固有運動から、アウトフローとぶつまっている周辺ガス雲のほうがかきまわられていると推定できる。定量的な評価によると、その状況から、アウトフローとぶつかる若い星周辺のガス雲中に100 AU未満のスケールで少なくとも1-2桁にわたる密度むらが存在することが示唆さ

れる。アウトフローに付随する水メーザーを通して、星形成時に降着してくるガス中にこのような塊がすでに形成されていることが、明らかになったのである。

またこのようなスポット列の変形が見られる現象は、若い星からの断続的な高速流（ジェット）の発生に伴って見られることもわかった¹⁸⁾。単一望遠鏡によるモニター観測で、急激な水メーザーの増光とその部分での加速（視線速度ドリフト）が見つかった。物理的に全く独立した複数のメーザースポットで同じ視線速度ドリフトが観測されたので、見かけ上の加速は正真正銘の加速と判定できる。これらのスポットが見られるガス塊群で、共通に付随するもの＝アウトフローによる周辺ガスの圧縮と加速が起きたのだろう。このような水メーザー増光現象の時系列解析を元に、アウトフロー発生源である生まれたての星そのものの表面で起きているガス降着の様子が、さらに明らかにされるものと期待される。先に紹介したメタノールメーザーを指標とした中心星成長の様子を把握する手法と似ているが、独立した手法でこれらに関する考察について検証できるはずだ。

一方、長周期変光星に付随する水メーザーは星の脈動変光と同じ周期的強度変化を示す¹⁹⁾。ただし、メーザー強度変化は可視光で見られる光度曲線からずれている。ではそのずれ（遅れ）は何を意味するのだろうか？

VERAでは、VLBI観測の隙間や保守作業の期間を利用して、年周視差計測対象メーザー源に対して単一望遠鏡観測によってメーザー強度を監視している。何しろ「空き時間」を利用しているので、個々のメーザー源に対して必ずしも期待とおりの頻度で観測できるわけではない（逆にできていたのでは、本業のVLBI観測が進んでいないことになり、実に悩ましい）。それでも、図2で示すように、水メーザーの強度変化を連続的に追跡できる例が100天体程度存在していた時期がある。そのうち46個の変光星水メーザーについ

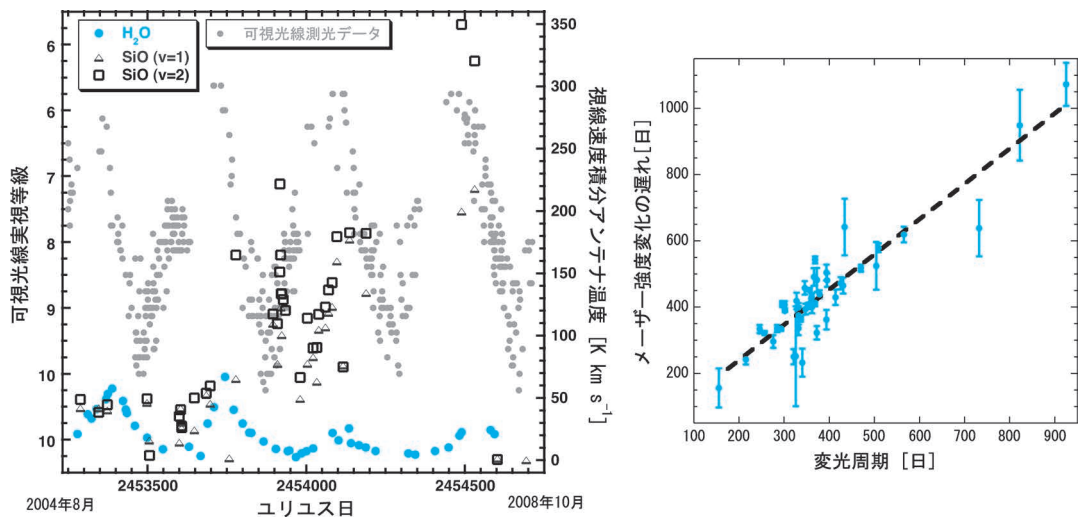


図2 左図: VERA 入来および水沢 20 m 鏡で観測された、うみへび座 W 星に付随する水および一酸化ケイ素 ($\nu=1, 2$ $J=1 \rightarrow 0$) メーザーの明るさの時間変化²⁰⁾。水沢局で一酸化ケイ素メーザーが観測されていた時期に絞って表示してある。星の明るさの変化との比較のため、American Association of Variable Star Observers (AAVSO) が収集する可視光線測光データも併せて表示してある。メーザー源の明るさの指標として、スペクトル上のメーザー輝線が見える範囲のアンテナ温度を周波数 (視線速度) 方向に積分して得られる値を用いている。右図: 46 個の変光星に付随する水メーザーの強度変化に見られる、変光周期と強度変化の遅れとの間の相関²¹⁾。強度変化の遅れ/周期 (=位相) が 0.5 未満のデータについて、縦軸に 1 周期分の時間を水増しすると、図のとおり、2 本あった線状分布が 1 本の線にまとまり、強い相関が現れる。

て、変光周期と強度変化の遅れとの関係を調べると、きれいな相関関係があることがわかった²¹⁾。このようなメーザーの強度変化の原因の説明として、二つの可能性が考えられる。一つは、中心星からの赤外線放射が作り出す星周ダストへの放射圧が大振幅で周期的なもののため、星周ガス縁中に衝撃波を生み出し、それがメーザー放射領域にまで伝播してメーザー励起を促す、という説である²¹⁾。もう一つは、中心星からの放射による温度変化によってメーザー励起の効率が時間変化するため、というものである²²⁾。星の光度が大きくなるにつれてメーザー励起環境が星から離れていき、衝撃波の到達時間や星周ガスの加熱に要する時間が長くなるので、どちらの現象が実際に起こっているのかについては、今後の研究で見分ける必要がある。これは、脈動変光衝撃波が水メーザーの領域まで到達するのかどうかの判定や、星の質量放出率 (とその時間変化) の評価にもかか

わる²²⁾。

ちなみに、最近注目されるサブミリ波水メーザーについては別の文献を参考にされたい²³⁾。

3.3 一酸化ケイ素 (SiO) メーザー

一酸化ケイ素メーザー源の VERA 観測は、数的に限られている。VERA で観測できる最高周波数付近にあって感度的に観測条件が厳しくなること、一酸化ケイ素メーザーの構造が複雑になっており VERA が主眼に置く年周視差計測に適さないこと (リング状分布を利用した年周視差計測については文献 24 を参照のこと) などが、その理由である。

しかし、遠方クェーサーを位置比較基準天体として利用する VERA アストロメトリ観測により、より広い水メーザースポット分布中における一酸化ケイ素メーザースポット群 (ほぼ星のある場所に対応) の存在場所を決められる。そうすると、水メーザースポット分布だけでは把握できない非

軸対称的なアウトフローの存在が確認できる²⁵⁾。進化末期の星で見られる激しい質量放出が、ゆっくり自転しているはずのほぼ球形に近い星から著しく球対称から逸脱した異方性をもって行われていることを示唆する。その詳細を把握する上でも、星の位置とその運動を把握することが重要になってくる。またメーザー源絶対座標の正確な測定は、異種一酸化ケイ素メーザーマップを正確に重ね合わせてより精度の高い、時間変化も含めた励起機構に関する議論をするのにも欠かせない。

この10年間で、一酸化ケイ素メーザー源研究で世界的に大きな進展が見られた。43 GHz帯の周波数をもつ $J=1\rightarrow 0$ に加えさらに高周波数帯で見られる $J=2\rightarrow 1$ や $J=3\rightarrow 2$ メーザーのVLBI撮像が行われるようになったことが、その理由の一つに挙げられる。結果、振動励起状態(v)が異なるメーザー間では似たような分布をしているのに、エネルギー準位の差がずっと小さい異なる回転励起状態(J)のほうでスポット分布の大きな差異が発見された²⁶⁾(J, v については図1を参照)。しかもこの傾向は、酸素過多の星でのみ見られ、酸素/炭素原子個数比が1程度の星(S型星)では見られない。このことから、たまたま星周ガス中の水分子からの赤外線輝線放射と一酸化ケイ素分子による吸収および励起に必要なそれぞれの波長がほぼ一致していることを利用して、一酸化ケイ素分子をより高い v を持つ準位に励起するだけでなく、異なる J 遷移のメーザー放射の分布まで変えてしまうことが起きている、という説明がなされた。例えば、一酸化ケイ素 $v=1, J=0$ から $v=2, J=1$ への励起において水の $8\ \mu\text{m}$ 中間赤外線放射との“輝線波長の一致”が利用される、という具合である。少なくとも、 $v=1, 2$ の準位にある $J=2\rightarrow 1, J=1\rightarrow 0$ メーザーでそのような作用を受けているらしい。

しかし一酸化ケイ素メーザー輝線はこれらだけではない。実際に観測されているより v が高い準位のメーザーではどうなっているのだろうか？

励起に必要なエネルギーを温度に換算すると、変光星の表面温度(2,500–3,500 K)の遥か上となる。

本論筆者らは、よく観測される一酸化ケイ素 $v=1, 2, J=1\rightarrow 0$ に比べて極端に弱い $v=3, J=1\rightarrow 0$ メーザーをVLBIで撮像する機会を長らくうかがっていたが、20年近く他の誰も挑戦しなかったお陰で、「世界初」の機会に巡り会うことができた。非常に微弱なこの $v=3$ メーザーを撮像すべく、VERAに加えて国立天文台野辺山45 m鏡と情報通信研究機構(NICT)鹿嶋34 m鏡も組み合わせた観測を要望した。しかし意外にも、 $v=3$ 輝線のVLBI初撮像はVERA単独で成功した²⁷⁾(図3)。その時は、輝線波長の一致から予想される場合は異なり、 $v=3$ メーザーはより中心星の近くに見えたのである。

そうなると、先述したとおり脈動変光衝撃波に伴う衝突励起の可能性が高いということになる。ところが2カ月後の追観測(望遠鏡6台を総動員し広がった淡い成分も検出)では、 $v=3$ と $v=2$ メーザーの分布がよく似ており、放射励起を示唆する結果になってしまい、さらに謎が深まった。メーザー励起の主要な仕組みが時間変化しているかもしれない。 $v=3$ 一酸化ケイ素メーザーは2013年現在までに、未発表のものも含めて6天体でVLBI検出/撮像に成功している²⁸⁾。とにかく、ダイナミックな現象を伴う脈動変光星周辺を詳細に調べるための手がかりとなるメーザー輝線、という重要な研究対象を新たに獲得したことになる。

4. 今後10年間におけるメーザー源研究の課題

以上紹介したこれまでのVERA/JVNによるメーザー源研究は、メーザーや付随天体の種類を問わず、短時間メーザー源時間変動の追跡の重要性をさらに際立たせることになった。つまり、メーザー励起のエネルギー供給源である生まれた

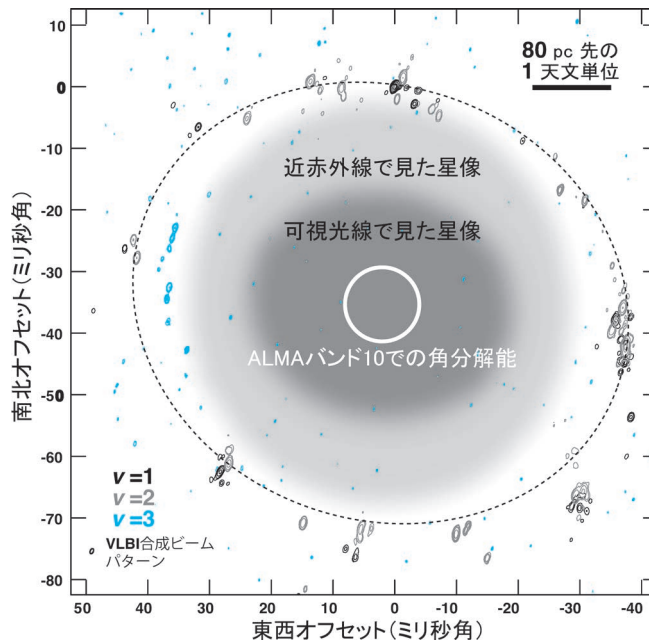


図3 2009年2月にVERA4局単独のVLBI観測で撮像したうみへび座W星からの一酸化ケイ素 ($v=1, 2, 3 J=1 \rightarrow 0$) メーザー放射⁽²⁷⁾. 干渉計ビームでも分解されないコンパクトなメーザースポット群が、星の周りにリングを成して分布している。 $v=1, 2$ メーザースポット群に対して、 $v=3$ メーザースポット群は星のより近い場所で光っていることがわかる。異種メーザー輝度分布マップの重ね合わせにおける位置ズレは、3ミリ秒角以内だと推定されている。その2カ月後に行われた野辺山宇宙電波観測所45m鏡および情報通信技術研究機構(NICT)鹿嶋34m鏡を加えたVERA観測では、空間的にさらに広がったメーザースポット群も検出している。そのときは $v=2, 3$ メーザースポット群の分布がお互いに似ていたが、スポットサイズは5ミリ秒角以内だったので、上図におけるスポット群位置の相違は使用した望遠鏡群の相違だけでは説明がつかず、スポット群分布の時間変化によるものと推定される。

ての星や進化末期の星々にさらに肉薄した領域に見られる現象を追求していることを意味する。ALMAやVLTI(欧州南天天文台光赤外線干渉計)は、今やVLBIの角分解能に迫る解像度を達成しようとしている。VLBIを使ったメーザー研究が独自性あるものであり続けるためには、それらよりも時間分解能を上げた連続撮像、つまり「メーザー放射の動画」を作成する方向に進むことが望まれる。できれば、星形成領域ならば水とメタノール、進化末期星ならば水と一酸化ケイ素メーザーの同時観測が望ましい。時間差あるいは空間分布の差に対応したズレを伴った共通の時間変動が期待されるからだ。しかし、VERAやJVNを単発で運用しているだけでは、それらを実現で

きない。

現在、二つのVLBI専用望遠鏡群—VERAと隣国韓国のVLBI網(KVN)—を組み合わせた継続的大規模VLBI観測の可能性を、検討チームを作って模索中である⁽²⁹⁾。メーザー源研究だけでなく、活動銀河中心核研究チームも同様なVLBI連続撮像観測の検討を進めている(一部はVERA単独で実行中⁽³⁰⁾)。その結果、KVN+VERAアレイならば2-3時間の観測で十分な画質が得られることが判明し、VLBAですでに実行されている2週間間隔での連続撮像は時間制約の範囲でできそうである。JVN望遠鏡も加われば、各望遠鏡の都合にあまり左右されずVLBI連続撮像が継続できるようになる。

いよいよ当初描いていたVLBI連続撮像が実現しそうである。幸か不幸か、レーザー輝線の所在が確認されてから20年以上経過して初めてわれわれの手でVLBI撮像に成功した、という例が示すように、VLBI撮像においては全く手つかずの面白いテーマがいっぱい残っている。10年スケールで情熱をもち続ければ実現する観測・成就する研究もある。これらの実例に励まされつつ、今後もあせらず気長に進めていこうと思っている。

謝 辞

本文で紹介した、特に筆者自らによる研究の拠り所となっているVERAや野辺山45 m鏡、NICT鹿嶋34 m鏡を使った観測（VLBI観測、単一望遠鏡）とそのデータ処理にかかわった国立天文台水沢VLBI観測所および鹿児島大学卒業生の皆さんに、この場を借りて御礼申し上げます。国内で行われたレーザー源励起機構に関わる研究について、紙面の関係でこの本文では取り上げることができなかったものもあります。そのことについてはお許しを請いたいです。

参考文献

- 1) Gnidakis I., Diamond P. J., Kemball A. J., 2010, MNRAS, 406, 395
- 2) 例えば, 本間希樹, 2013, 天文月報 106, 310
- 3) Genzel R., Downes D., 1977, A&A 30, 145
- 4) 例えば, 今井 裕, 2000, 天文月報 95, 307
- 5) Elitzur M., 1992, Astronomical Masers (Kluwer, Dordrecht)
- 6) Grey M., 2012, Maser Sources in Astrophysics (Cambridge University Press, Cambridge)
- 7) Richards A. M. S., et al., 2012, A&A 546, A16
- 8) Bartkiewicz A., et al., 2009, A&A 502, 155
- 9) Fujisawa K., 2012, IAUS 287, 288
- 10) Goedhart S., et al., 2012, IAUS 287, 85
- 11) Sugiyama K., et al., 2008, PASJ 60, 1001
- 12) Fujisawa K., et al., 2012, PASJ 64, 17
- 13) 松本尚子 ほか, 2012, 日本天文学会秋季年会, P122a
- 14) Fiebig D., 1997, A&A 327, 758
- 15) Imai H., et al., 2006, PASJ 58, 883
- 16) Imai H., et al., 2007, PASJ 59, 1107
- 17) Motogi K., et al., 2008, MNRAS 390, 523
- 18) Motogi K., et al., 2011, MNRAS 417, 238
- 19) 中川亜紀治, 2013, 天文月報 106, 417
- 20) 塩崎智史, 2011年度, 鹿児島大学修士論文
- 21) Shintani M., et al., 2008, PASJ 60, 1077
- 22) Höfner S., 2011, ASP Conf. Ser. 445, 193
- 23) 廣田朋也, 2013, 天文月報 106, 7月号予定
- 24) Kamohara R., et al., 2010, A&A 510, A69
- 25) Choi Y. K., et al., 2008, PAJS 60, 1007
- 26) Soria-Ruiz R., et al. 2004, A&A 426, 131
- 27) Imai H. et al., 2010, PASJ 62, 431
- 28) Imai H. et al., 2012, PASJ 64, L6
- 29) 澤田-佐藤聡子 ほか, 2013, 天文月報 106, 7月号予定
- 30) Nagai H., et al., 2013, PASJ 65, No. 2, 24

Excitation Mechanism of Astrophysical Masers Explored with VERA

Hiroshi IMAI

Graduate School of Science and Engineering,
Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto,
Kagoshima-shi, Kagoshima 890-0065, Japan

Abstract: VERA astrometry to measure trigonometric parallax distances to stars in the Milky Way Galaxy has succeeded by using astrophysical masers as position reference. Here the author focuses on study of the physical properties of the masers themselves and their implication in understanding of young stellar objects and evolved stars that host such masers. Systematic single-dish monitoring observations with the VERA and JVN telescopes have played important roles in understanding some types of time variation of the masers and their origins. Unique maser lines have been mapped for the first time in VLBI observations, which will become a new probe of maser physics and study on interstellar and circumstellar environments.