

VERAとALMAによるオリオンKLの 詳細観測



廣田 朋也

〈国立天文台水沢VLBI観測所 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: tomoya.hirota@nao.ac.jp

私たちは、VERAを用いた位置天文観測のプロジェクトとして、太陽系から最も近い大質量星形成領域であるオリオンKLの水（ H_2O ）メーザー、一酸化ケイ素（ SiO ）メーザーの観測を行い、オリオンKLの距離を約420 pcと高精度で決定しました。この成果は、VERAによる最初の距離計測結果の一つとして発表されています。さらに、私たちはVERAによるメーザー位置天文観測と合わせ、最近ではALMAを用いたミリ波・サブミリ波帯の新たな水メーザーの観測も始めています。本稿では、特にALMAによるオリオンKLの振動励起状態にある高エネルギー水メーザーの初検出の成果を紹介し、将来のVERAとALMAによる高空間分解能での共同観測について展望します。

1. はじめに

星は宇宙空間に存在する希薄なガスが重力的に収縮することで生まれる、と考えられています。しかし、詳しく見てみると、星形成のシナリオについてはいまだに解明されていない謎が多く残っています。特に、太陽質量の8倍を超えるような大質量星形成については、太陽系近くにサンプルが少ないこともあって十分な解像度、感度の観測的研究が不十分であり、太陽と同じような質量降着のできるのか、それとは異なり、小さな星々の合体によってできるのか、などといった基本的な問題点も未解決のまま残されています¹⁾。

このような大質量原始星の観測には、電波、特にさまざまな星間分子からのスペクトル線が放射されているミリ波・サブミリ波帯での観測が不可欠です。これは、ミリ波・サブミリ波帯では星間塵による減光の影響を受けにくいために、遠くの星間分子雲奥深くに埋もれた大質量星形成領域の検出が容易であり、さらに、干渉計の技術によって他の波長の観測に比べて高い解像度が得られる

というメリットがあるからです。

太陽系から最も近い大質量星形成領域は、オリオン大星雲中にある赤外線天体オリオンKLであるということが知られています。Kleinmann氏とLow氏によって1967年に発見されたため、その頭文字をとってKL天体と呼ばれています³⁾。オリオンKLはあらゆる波長帯で放射強度が強いことから、1967年の発見以来、大質量星形成機構を調べる最も有望な観測対象として認識されています⁴⁾。

2. VERAによるオリオンKLの詳細観測

2.1 オリオンKLの距離決定

私たちは、VERA⁵⁾を用いて、オリオンKLにおける物理量を推定するうえで必要不可欠な高精度距離計測を行いました。水分子の出す22 GHz（波長1.3 cm）のメーザーと呼ばれる強い電波スペクトル線の位置天文観測により年周視差を計測し、その距離を 437 ± 19 pc（1 pc = 3.26 光年）と決定しました⁶⁾。これは、VERAによる初めての

距離計測結果の一つとして発表されています。その後、より波長の短い43 GHz（波長7 mm）の一酸化ケイ素レーザーを用いた観測により、距離を 418 ± 6 pcとさらに高精度化することにも成功しています⁷⁾。

これとほぼ同じ時期に、アメリカのVLBIネットワークVLBAでも、オリオンKLにある電波連続波源の位置天文観測により距離 389^{+24}_{-21} pc⁸⁾、 414 ± 7 pc⁹⁾ という結果を立て続けに報告しています。VERAの結果は過去に提唱されていた値 480 ± 80 pc¹⁰⁾ よりも有意に小さくなっていますが、VLBAとはほぼ一致しています。1年間に四つの独立な成果が発表されるということは、オリオンKLの距離決定がいかに重要であることを示しているだけでなく、その後の位置天文研究が厳しい競争になることも予感させました。

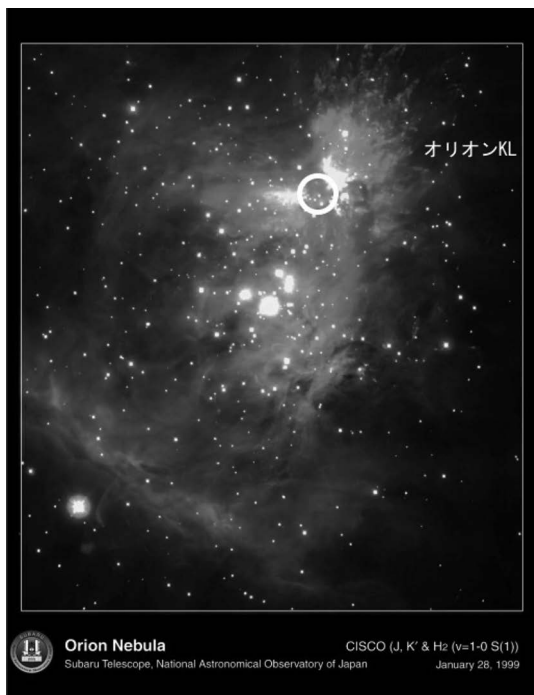


図1 すばる望遠鏡によるオリオン大星雲の赤外線写真²⁾。右上に見える星雲の中心付近がオリオンKLです。参考のため、ALMAが観測した範囲（図4）を白丸で示しました。

2.2 オリオンKLの三次元運動の計測

オリオンKLの原始星から噴き出される高速のガス流（アウトフロー）は、すばる望遠鏡の写真（図1）を見ても複雑な様相を呈しています²⁾。その放射源についてはまだ完全には特定されていませんが、さまざまな波長帯での高空間分解能観測などから、電波源Iと呼ばれる大質量原始星が候補と考えられています¹²⁾。電波源Iには一酸化ケイ素レーザーが付随しており⁷⁾、その速度や空間構造は水レーザーでトレースされるアウトフローと直交する方向に分布しています（図2, 3）。このことから、電波源Iに付随する一酸化ケイ素レーザーは大質量原始星周りを回転する星周ガス円盤に、22 GHz水レーザーはその回転軸に沿って噴き出すアウトフローに付随していると考えられます^{6), 7), 10), 11)}。VERAを用いた水レーザーや

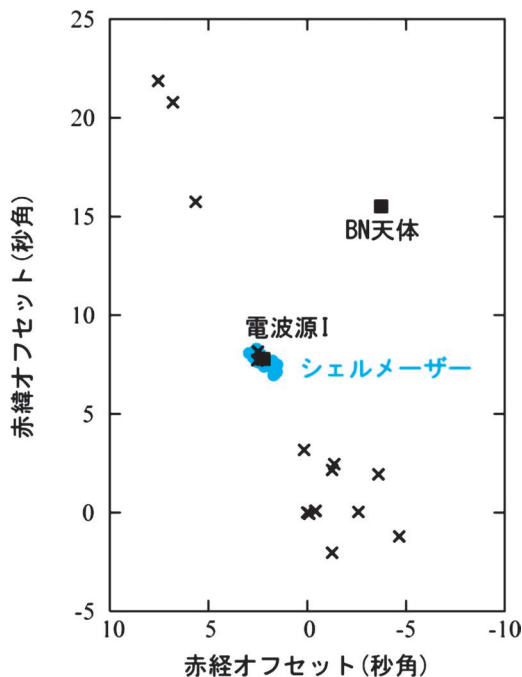


図2 VERAで観測された22 GHz水レーザー⁶⁾とアメリカの電波干渉計VLAで観測された水レーザー群（シエルレーザー）¹¹⁾の分布。電波源Iから北東-南西(左上-右下)に伸びるアウトフローを示唆しています。

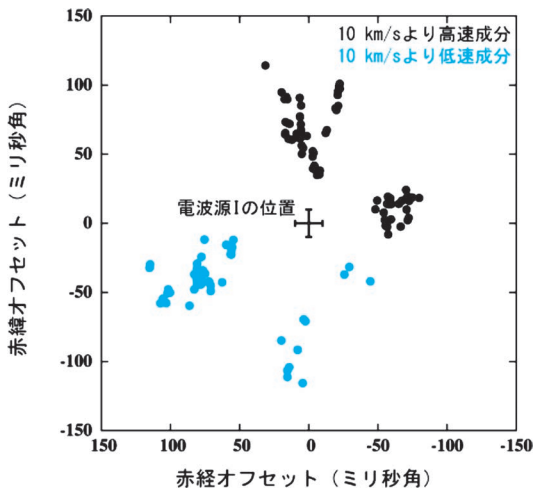


図3 VERAで観測された43 GHz一酸化ケイ素レーザー源の分布⁷⁾。レーザーの視線速度は、北東-南西(左上-右下)を回転軸とする回転円盤を示唆しています。視野が図1, 2, 4に比べて極めて小さいことにご注意ください。

一酸化ケイ素レーザーの3次元運動(視線速度と固有運動)計測により、オリオンKLのアウトフローやその励起源である電波源Iの力学的性質が解明されつつあります¹³⁾。

3. ALMAによるオリオンKLミリ波帯水レーザーの観測

3.1 ミリ波・サブミリ波水レーザー検出の可能性

すでに述べたように、私たちはVERAによるセンチ波帯の水レーザーや一酸化ケイ素レーザーを用いた観測的研究を進めてきました。一方、これらの分子はミリ波・サブミリ波帯でも異なる励起状態のレーザー輝線を放射していることが期待されています。励起状態の異なる複数輝線の観測は、温度や密度、分子組成のような放射源の物理的状态を明らかにするうえで重要です。このための観測として、私たちは初期運用の始まったアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計ALMAに注目しました。オリオンKLにある分子ガスは、特に多くの種類の星間分子が存在していることが知られており、ALMAの高い感度によって過去に未

検出のスペクトル線が検出されることも期待できます。

ほかの多くの望遠鏡同様、ALMAでも最初の科学評価の対象の一つがオリオンKLであり、観測データは2012年5月に世界中の研究者に公表されています。私たちは、そのデータの周波数帯域内に、これまでオリオンKLでは検出されていなかった232 GHz(波長1.3 mm)の水分子輝線が含まれていることに着目しました。この輝線は振動励起の状態にある水分子からの放射であり、絶対温度に換算して3,500 K(3,200°C)という高エネルギーの励起状態にあります。これは、22 GHz帯の水レーザー(振動基底状態のためやや低い640 Kの励起エネルギー)、43 GHz帯の一酸化ケイ素レーザー(こちらは第1, 第2振動励起状態にあり、それぞれ1,800 K, 3,500 Kとやや高い励起エネルギー)と同程度かそれよりも高温領域から放射されることを意味しています。このような高温領域からの振動励起水分子輝線のレーザーは、これまでには恒星進化末期の晩期型星でしか見つかっていませんでした¹⁴⁾。

一方、オリオンKLは晩期型星以外では数少ない一酸化ケイ素レーザーを伴う星形成領域3天体のうちの一つとして知られており、星形成領域としては特異な天体として認識されています¹⁵⁾。そこで、私たちは「晩期型星のように一酸化ケイ素レーザーが検出されるオリオンKLでは、やはり晩期型星でしか見つからない高温ガスからの振動励起水レーザー輝線も検出されるのではないか?」と考えました。過去には、この輝線は口径10 mクラスのミリ波望遠鏡で検出が試みられていますが、検出には成功していません¹⁴⁾。ですが、ALMAによる桁違いの感度と高い解像度ならば初検出の可能性があるのでないか、と考えたのです。

3.2 オリオンKLにおける振動励起水レーザーの初検出

ALMAによるオリオンKLの科学評価につい

て、簡単にまとめておきます。観測は、2012年1月20日に行われました。バンド6と呼ばれる215-245 GHz帯（波長1.2-1.4 mm）の広い周波数帯を複数回に分けて観測しました。観測や初期データ解析は、ALMA観測所の運用チームによって行われ、さまざまな補正（較正）が行われたデータが全世界の研究者に公開されています。私たちは、振動励起の水分子輝線がある232 GHz周辺のみの特化して詳細な解析を行いました。

その結果、振動励起水分子輝線の周波数で明確な信号が検出されました。過去の観測では、信号か雑音か判別がつかないレベルのデータしか得られておらず、オリオンKLで検出されている既知の分子輝線にも該当しませんでした。しかし、分子分光のデータベースと比較したところ、振動励起水分子輝線とほぼ同じ周波数に、他の分子（ギ酸メチル、 HCOOCH_3 ）からのスペクトル線があることがわかりました。

もし今回の観測がこれまで同様単一のミリ波望遠鏡による観測であれば、この時点で「検出され

た輝線は水分子かギ酸メチルかは判別不能」という結論で、新しいことは何もわからない、ということになってしまいますが、干渉計であるALMAでは天体からのスペクトル線を「電波写真」として像合成（イメージング）することが可能です。

検出された輝線の像合成を行ったところ、図4のような画像が得られました。参考までに、ギ酸メチル輝線として同定されている別の周波数にあるスペクトル線のイメージも並べておきます。すると、振動励起水分子輝線の周波数のイメージとギ酸メチルの周波数のイメージでは、1カ所違いが見つかりました。振動励起水分子輝線を含むイメージでは、分子ガスの北側（上側）でスペクトル線強度の強い場所がありました。振動励起水分子輝線のイメージ（ギ酸メチルの放射も寄与あり）からギ酸メチルのイメージを差し引くと、振動励起水分子輝線からの寄与だけが浮かび上がってきました。この振動励起水メーザーの強い場所は、予想どおり一酸化ケイ素メーザーを放射している電波源Iに一致することがわかりました。電

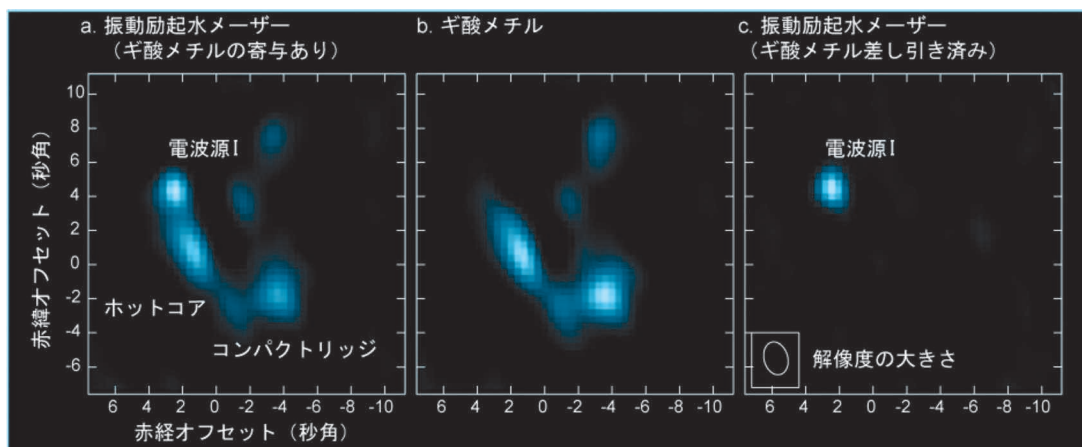


図4 (a) ALMAによるオリオンKLの振動励起水メーザーのイメージ。ほぼ同じ周波数にあるギ酸メチル分子からの放射も混ざっています。(b) 近い周波数にある別のギ酸メチル分子のイメージ。電波源I付近には明るい成分はなく、ギ酸メチルのような有機分子が多い「ホットコア」「コンパクトリッジ」だけが明るく見えています。(c) aとbのイメージの引き算(a-b)。振動励起水メーザーの周波数付近のイメージからギ酸メチルの成分を差し引くと、電波源I付近だけに振動励起水メーザーの成分があることがわかります¹⁶⁾。

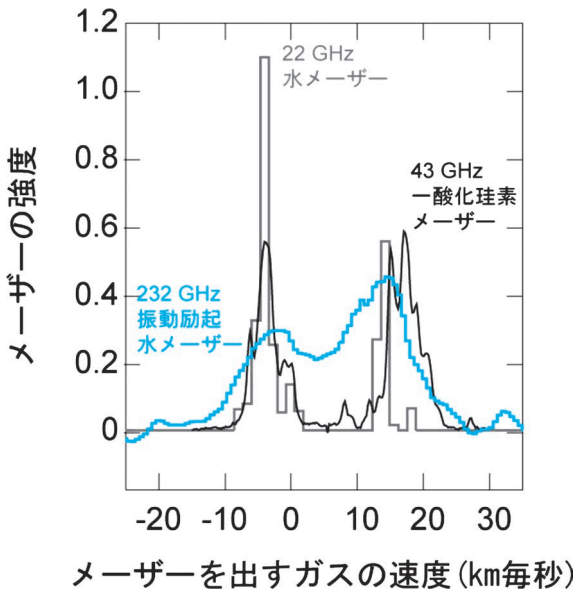


図5 電波源Iでのメーザースペクトル線の比較。232 GHz振動励起水メーザーは今回ALMAで観測された結果¹⁶⁾、22 GHz水メーザーはVLAで観測された結果¹¹⁾、43 GHz一酸化ケイ素メーザーはVERAによる結果⁷⁾を引用しています。

波源Iの周りにある高温ガスから振動励起水メーザー輝線が放射されていることは明白です。

より詳しく放射領域の性質を調べるため、VERAによる一酸化ケイ素メーザーのスペクトル線⁷⁾、および米国の電波干渉計VLAで過去に行われた22 GHz水メーザーのデータ¹¹⁾を比較してみました。すると、図5のように、今回ALMAで得られた232 GHz振動励起水メーザーのスペクトル線は22 GHz水メーザー、43 GHz一酸化ケイ素メーザーとほぼ同じ速度のガスから放射されていることがわかりました。一酸化ケイ素メーザーは電波源I周囲の回転円盤から⁷⁾、22 GHz水メーザーは円盤の回転軸に沿って噴き出すアウトフローによって励起されていると提唱されています^{6), 10), 11)}。そのため、今回ALMAで見つかった振動励起水メーザーも、電波源Iごく近傍のアウトフローか回転円盤によって励起されていることが予想されます。

4. VERAとALMAによる将来の共同研究の展望

ALMAにより、星形成領域では初めて振動励起状態にある水メーザー輝線が検出されました。これはALMAの高い感度と撮像能力が発揮されたおかげと言えます。科学評価観測は、ALMAのアンテナは16台だけ、そして、その基線長も最大で350 m程度でしたが、たった20分程度の短い観測でこれまで検出が不可能だった微弱な輝線の撮像に成功しています。しかし、残念ながらこのときの分解能は約1.5秒角であり、VERAの分解能1ミリ秒角の1,000倍もあります。一酸化ケイ素メーザーの広がりや0.2秒角程度のスケールであり⁷⁾、今回のデータでは232 GHz振動励起水メーザーが一酸化ケイ素メーザーのような回転円盤から出ているのか、22 GHz水メーザー同様にアウトフローから出ているのか、判別することはできませんでした。

ALMAの最終形態は、アンテナ数66台、最大基線長は18.5 kmとなります。解像度は今回の観測データの50倍に達し、VLBIに近い高空間分解能で電波源I周辺のアウトフローや回転円盤の空間構造をイメージすることが可能になります。VLBIと同程度の解像度で観測が行われれば、ALMAでもVERAのようにメーザー源の固有運動が計測できるようになります。今回検出された232 GHz振動励起水メーザーの3次元的な構造と運動の情報を用いて、この輝線がアウトフローで励起されているのか、あるいは回転円盤に付随しているのかを判別できるようになり、電波源Iごく近傍の高温領域のガスの運動が完全に解明されると期待されます。

一方、VERAをはじめとしたVLBIでは、すでにALMAを超える解像度でオリオンKL電波源Iごく近傍のガスの運動をとらえることに成功しています。VERAで得られるセンチ波帯のメーザーとALMAによって得られるミリ波・サブミリ波

帯のメーザーを組み合わせた複数スペクトル線の情報があれば、メーザー放射領域の温度や密度、水分子の存在量といった物理的な性質をより詳しく知ることが可能になります。さらに、ALMAではメーザー以外の電波スペクトル線や星間塵からの放射も高い分解能で観測することが可能です。これらを組み合わせると、メーザーだけでは見ることができない低温ガスの運動や構造も明らかにすることができます。このような研究により、オリオンKLで生まれたばかりの大質量原始星である電波源Iがどのような性質をしているのか、そしてその周辺のガスはどのような運動をしているのか、初めて解明されると言えます。回転円盤やアウトフローの形状、物理量がわかれば、大質量星形成のシナリオについても重要な知見(例えば質量降着で説明できるのか、あるいは合体説がありうるのか? など)を与えることになります¹⁾。

実際に、私たちはALMAの初めての共同利用観測サイクル0で、より高い周波数帯でのサブミリ波水メーザー輝線の観測を始めています。現時点ではまだ紹介できませんが、すでにオリオンKL電波源Iの力学的構造やミリ波・サブミリ波帯水メーザーの励起機構を明らかにするヒントをつかんでいます。近い将来、VERAとALMAの最高空間分解能観測の結果を組み合わせることによって、1967年の発見以来謎のままであるオリオンKL天体の正体を解明し、そこで起こっている大質量星形成機構を解明することができることを期待しています。

謝 辞

本研究はJSPS科研費(16540224, 20740112, 24684011)の助成を受けて行われました。また、本稿3章で紹介した研究は、ALMA科学評価観測(Science Verification)で取得されたデータ ADS/

JAO.ALMA#2011.0.00009.SVに基づいて行われました¹⁶⁾。ALMAの関係者、特に科学評価観測の実行や解析に携わった方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば Bally J., Zinnecker H., 2005, AJ 129, 2281
- 2) Kaifu N., et al., 2000, PASJ 51, 1
- 3) Kleinmann D. E., Low F. J., 1967, ApJ 149, L1
- 4) 例えば O'Dell C. R., 2001, ARA&A 39, 99
- 5) 川口則幸, 2013, 天文月報 106, 304
- 6) Hirota T., et al., 2007, PASJ 59, 897
- 7) Kim M. K., et al., 2008, PASJ 60, 991
- 8) Sandstrom K. M., et al., 2007, ApJ 667, 1161
- 9) Menten K. et al., 2007, A&A 474, 515
- 10) Genzel R. et al., 1981, ApJ 244, 884
- 11) Gaume R. A., et al., 1998, ApJ 493, 940
- 12) Menten K. M., Reid M. J., 1995, ApJ 445, L157
- 13) 金 美京, 2011, 博士論文(東京大学)
- 14) Menten K. M., Melnick G. J., 1989, ApJ 341, L91
- 15) Zapata L., et al., 2009, ApJ 691, 332
- 16) Hirota T., Kim M. K., Honma M., 2012, ApJ 757, L1

High Resolution Observations of Orion KL with VERA and ALMA

Tomoya HIROTA

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

Abstract: We have been carrying out VLBI astrometry of the 22 GHz H₂O and 43 GHz SiO masers by using VERA, and determined its distance of 420 pc. This is one of the first astrometric results from VERA. In addition, we have started observational studies with ALMA of the millimeter and submillimeter H₂O masers in Orion KL. Here we present the recent result of the first detection of the vibrationally excited H₂O masers at 232 GHz in star-forming regions with the ALMA Science Verification data, and future prospects of collaborative studies with VERA and ALMA.