

年老いた星からの「噴水」 ： AGB 星からの分子ガスジェットの発見

今 井 裕

〈Joint Institute for VLBI in Europe, Postbus 2, 7990 AA, Dwingeloo, the Netherlands〉

e-mail: imai@jive.nl

星の進化の最終段階に見られるミラ型変光星の一種でもある「水酸基／赤外線星」, W43A, において、私たちは、分子ガスを多量に含んだ非常に細長い高速ジェットを、水蒸気メーザーの VLBI (超長基線電波干渉計) を用いた観測によって発見しました。これは、惑星状星雲が形成される 1000 年以上も前 (漸近巨星枝星の段階) には既に、その形状を決定付ける現象が存在することを意味します。ここでは、その発見の詳細と天文学的意義に加え、発見に至るまでの幾つかのエピソードを紹介します。

1. プロローグ

2000 年 11 月、VLBI 観測データの解析をほぼ終えて、やっと電波マップを拝める時がやってきました。その当時、鹿児島大学の大学院生だった小原久美子さんは子供を寝付かせてから、私は東京からの出張帰りの日も含めて、深夜 11 時頃から早朝 4 時頃に水沢の天文台にて直接議論を交わし、小原さんの修士論文研究テーマの仕事を進めていました。今までのいきさつを振り返ってやれやれと思いつつながら紅茶を用意してすすり、私は彼女が操作するラップトップパソコンのモニタを何気なく見ていました。視線速度を少しずつ変化させてチャネルマップがコマ送りで表示されていくのをしばらくぼんやり眺めていたのですが、ものすごいものを自分たちは今見ているのではないかと気付いて、だんだん眠気が覚めていきました。私たちが研究に取り組んだ星は、星がその一生の最後に一瞬だけ見せる現象をまさに見せているのではないのか。1 年半後そのように論文にまとめて投稿し、2002 年 6 月ネイチャーにそれが掲載されました¹⁾。

2. “分子ガスジェット” の発見

私たちが発見したものは、W43A と呼ばれる天体

に付随する水蒸気ガスが放つメーザースポットの分布であり、それらが天球面上にはほぼ一直線上に並んだものでした (図 1 参照)。メーザー発光は、星形成領域や赤色巨星周辺で良く見られる現象です。水蒸気メーザー源は多数の細かいメーザースポット群から成り立っており、1 つ 1 つのスポットは 1 ミリ秒角を切る空間分解能を実現する VLBI (超長基線電波干渉法) によって見出すことができます。スポット群が原始星や赤色巨星からのフローに乗って運動している様子がよく観測されますが²⁾、たいていの場合、1 つ 1 つのスポットが点いたり消えたりしてクリスマス・ツリーのように見えたり、フロー自身も乱流にかき乱されているため、整然と動いているとはとても言えないくらい無秩序に分布し運動しています。ところが W43A 水メーザーの場合、スポット群の空間分布が長軸：短軸 = 85:1 という極端に細長いものであり、しかもその伸びている方向に 2 つのスポット群が ± 150 km/s のスピードで整然と遠ざかっていました。長軸の方向の速度分散に対し、その垂直面での速度分散はわずか 1/9 しかありません (図 1 及び図 2 参照)。その極め付けに、スポット分布パターンが螺旋上に良く乗り、あたかもジェットの軸がコマ振り運動をしているように見えます (図 3 参照)。

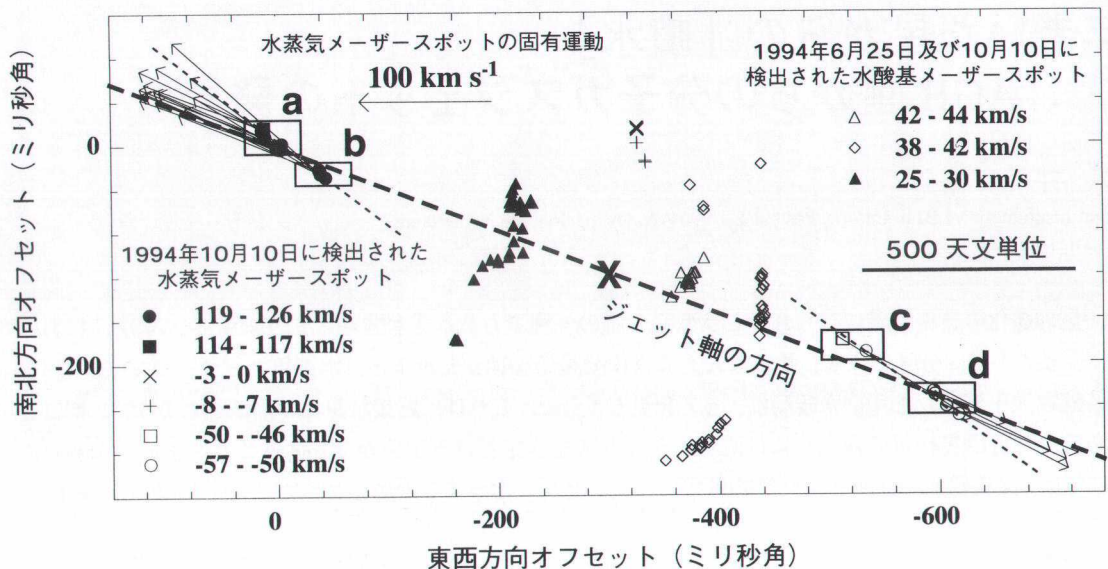


図1：VLBAで観測されたW43Aに付随する水蒸気及び水酸基メーザーの分布図。視線速度グループ毎に異なるプロットの形で表現している。水蒸気メーザースポットは細長く分布しているが、それは一直線上ではなく平行な二直線（細い破線）に沿って分布している。一方水酸基メーザースポットは円弧（多分ガスシェルの一部）を描いている。膨張ガスシェルの半径は500天文単位、膨張速度は9 km/s程度である。

- 1994年6月25日
- 1994年10月10日
- 1995年3月17日

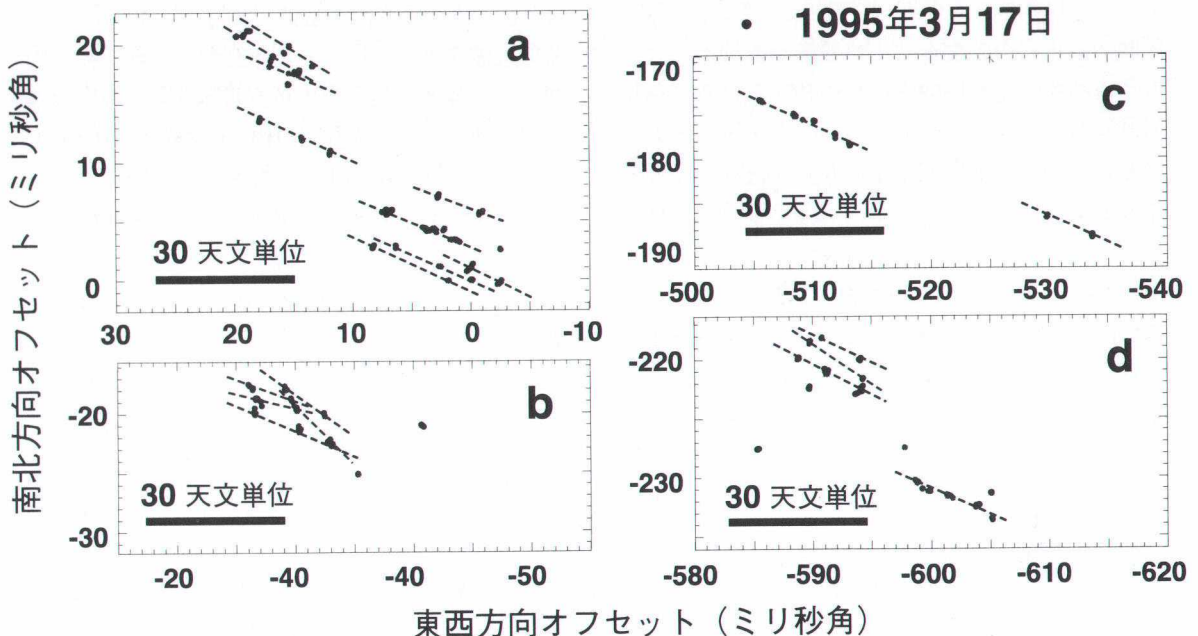


図2：W43A水蒸気メーザースポットの空間分布とその時間変化。図1 a-dの枠内を拡大表示してある。メーザースポット間の相対位置決定精度は、典型的には50マイクロ秒角。破線は、同定されたスポット固有運動の軌跡を表す。

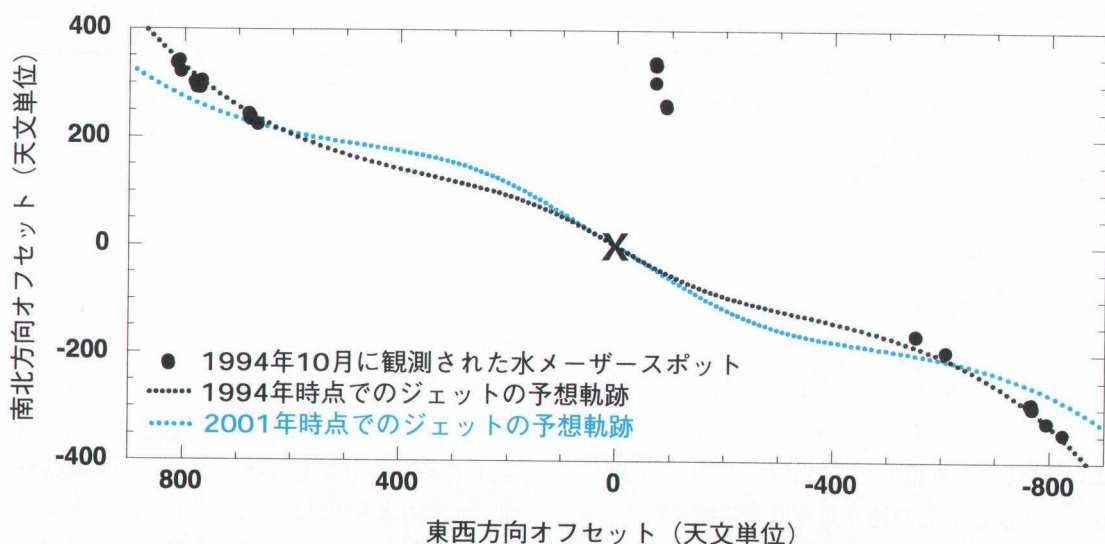


図3：W43A水蒸気メーザースポットの分布を再現するジェットのコマ振り運動のモデル。2001年における予想スポット分布パターンも表示してある。

宇宙では、正反対あるいは1方向に細長く伸びたジェットが、星形成領域や活動銀河中心核で数多く観測されています。しかし、極端な軸比をもったものは全て「可視光ジェット」とか「非熱的電波ジェット」と呼ばれるもので、数1,000K以上の高温ガスから成り立っているものです。私たちが発見したものは、水蒸気メーザーが存在し得るせいぜい400K程度で高密度（水素分子個数密度が $10^6/\text{cm}^3$ 以上）の分子ガスから成る「分子ガスジェット」で、しかもそれが進化末期の星からのものです。原始星や赤色巨星の周辺には豊富に高密度ガスが存在しますから、その中をジェットが突っ込んだら、衝突して衝撃波や乱流が発生し、上記のようなジェット軸に沿った綺麗な構造は崩れてしまうでしょう。だから、この分子ガスジェット自身がとても不思議な現象なのです。

3. 二人との出会い

10年近くも天文学研究を続けていると、ある意味非情な言い方ですが、どういう同僚とか共同研究者と共に仕事をしてきたか、ということもまた天

文学者としての成否に関わることを思い知らされます。だから、ここで紹介する二人の共同研究者にこの研究を通して巡り会えたことは、私にとっても掛け替ええない経験だと思っています。

その一人は、英国ジョドレルバンク観測所所長のフィリップ・ダイヤモンド教授です。この研究で使用した米国にあるVLBA (Very Long Baseline Array) の観測データは、もともと彼のものでした。私と同業の日本人研究者たちは、VLBAで観測する時には当初少なからず彼のお世話になってきたはずで、私自身も1997年米国・ソコロで初めて会ったのをきっかけに、現在2つの共同研究プロジェクトを彼と進めています。私も職場を転々とするポストクのはしぐれ、新発見とは程遠い目前の仕事をこなしながらも、別に観測データを手し研究をどんどん進めて、胸躍らされる研究成果を追い求めて研究に対するモチベーションを高く維持し、出版査読論文数を増やす必要があります。だから、その1つの方法として、VLBAでどんな観測が行われそしてどんな観測がまだデータ解析もされず論文として公表されていないか、今でも

時々注意深く眺めることがあります。そこで目に止まったのが彼のデータでした。「大学院生の指導に是非貴方のデータを使わせて下さい」。データアーカイブを使うのにわざわざこんなことをする必要もなかったのですが、研究進行状況を把握したかったし、彼と一緒に仕事がしたかったので、恐る恐る彼に伺いを立てました。「所長稼業で忙しくてデータ解析ができなかったけれど、自分の研究を手伝ってくれてどうもありがとうございます」。彼にとっては、15年以上も手掛けてきた研究だけあって^{3), 4)}、そのデータに気前良くアクセスを許して頂いたことには、今でもとても感謝しています。

もう一人は、上記の通り私が研究指導を行うことになった大学院生で、当時修士課程2年生になったばかりの小原久美子さんです。彼女には、育児休業明けのあと1年で修士論文を仕上げるという厳しいハードルが待っていました。実家が岩手県北上市ということもあり、本人の指導を指導教官の面高俊宏教授から水沢で仕事をしていた私に一任されることとなりました。私の研究を手伝ってもらえるという考えの甘い期待もありました。しかしそれ以上に、本人が上記のハードルを越えるべくどうやって指導したら良いものかと悩む、とてもスリル満点な教官稼業をこなすことになりました。彼女の国立天文台側の受け入れ指導教官であった笹尾哲夫教授を説得して、自宅でも天文台でも彼女が時間を見つけたらすぐに研究できるように、ラップトップパソコンを買ってもらいました。結局彼女は、育児と学業の両立という努力が報われて、この研究での第一発見者となったわけです⁵⁾。

「まだ論文になっていないデータがそこにある」、「何か面白い現象が見られるからVLBAで観測された」。これ以上この研究と対象天体に関しての知識を、最初は私すら持っていませんでした。ただ、研究には学問的知識にとどまらず、「情報収集をしっかりして、得られた情報を正しく解析し正しく判断する能力も不可欠だ」⁶⁾という自負を持っていた私としては、後者について小原さんを鍛える絶好

の機会じゃあないかと、勝手に開き直っていました。彼女には「W43A」をキーワードに論文検索を試してもらい、検索に引っ掛かった論文を、アブストラクトとイントロダクションだけでも構わないからと、片っ端から読んでまとめるように指導しました。また一方で、VLBIデータの解析法を指導する必要がありました。ところが、教科書やデータ解析ソフト(AIPS)のレシピには記述されていないデータ補正が必要であることがすぐに分かりました。予測通りにデータが正しく補正できるまで、来る日も来る日もAIPSの操作について試行錯誤を繰り返す日々が訪れ、それが3ヵ月以上続きました。電話やメールでのやりとりでは埒が開かない時は、東京・三鷹での出張が済むと、外環・東北自動車道経由の長距離ドライブを楽しんだその日のうちに、水沢で問題解決に取り組みました。

4. ネイチャー論文掲載までの道程

英国科学雑誌「ネイチャー」は米国の「サイエンス」と並んで、多分野の専門家や一般読者に最も注目される、とても権威のある雑誌です。天文学者と呼ばれる身分になることさえ夢であった自分にとっては、自分がネイチャー論文の筆頭著者になることは、一生に一度チャンスが巡ってくるか、いや多分叶わぬ夢で終わるだろう、それくらいの位置付けでした。水蒸気メーザースポットの分布とその時間変化が得られた時点で既に、ネイチャーに論文が受理されるかもしれないと予感していたのですが、実際には下記の長い道のりがありました。

自分たちの研究がどれだけ天文学全体にとって重要なものか、ネイチャーに投稿する前に自問自答するだけでなくいろいろな研究者からの意見を聞いてきました。国立天文台三鷹の身近な研究者同士のランチトークから始まり、2001年春季年会における記者会見や幾つかの国内や海外の研究会など、そのための多くの機会を設けました。しかし残念ながら、当初はあまり好意的な反応はありませんでした。その極めつけは上記記者会見でした。

第一発見者であり修士論文を無事仕上げた小原さんが発表し、補足説明を私がしました。ところが、会見後新聞記者の誰からも接触がなく、挙げ句の果てには、発表を小原さんがするように勧めた私に「女性研究者を単なる飾り程度にしか思っていないのね!」というとんでもない誤解まで年会実行委員の一人から頂いてしまいました。自分一人が勝手に舞い上がっていた状態からの大落差も手伝って、自分がやってきたことが否定されたような悔しさが募り、この研究を絶対うまく論文にまとめて見返してやると、その時強く心に誓ったものでした。

5. W43A の進化段階は？

しかし今思うと、私たちの研究成果を「天文学全体にとって重要なもの」に位置付け新聞記者の興味を引くには、かなり無理がありました。最も重要なにとっても曖昧だったポイントは、分子ガスジェットを放つ W43A そのものの正体です。ただ珍しい現象が見つかったに過ぎず、宇宙に存在する天体の進化や構造について新しく重要な知見を彼らに与えるためには、明らかに情報不足でした。

W43A 自身は、「水酸基／赤外線(OH/IR)星」だと考えられてきました。ミラ型変光星のような赤色巨星がさらに激しく星から質量を放出して、白色矮星になる直前に最も発達した星周ガスエンベロープを作り、可視光線では見えず赤外線で見えない段階に進化した星だと考えられています。OH/IR 星だと言われているのだから、この天体には水酸基メーザーという別のメーザーが存在します。このメーザーは上記水蒸気メーザーと全く異なり、ジェットではなく四方八方（実際にはジェット軸と垂直な面により多く）広がっている運動を示しています(図1参照)。これは、OH/IR 星に付随する典型的な水酸基メーザーの特徴です。このようなジェット + 球状に近いフローという混合系が OH/IR 星では今まで見つかっていなかったもので、W43A が星の進化の研究にとってとても面白い天体ではないだろうか、短絡的に考えたのが失敗

でした。そもそも次に述べる一酸化珪素メーザーがこの天体で発見されるまでは、私とダイヤモンドさんは W43A が原始星かもしれないとも思っていたのです。ジェットのように極端に細長くはないが 100 km/s 以上のスピードで吹き出す分子ガスからなる「フロー」の殆どは、星形成領域で見つかったからです。一方小原さんは、いろいろ情報収集したことを背景に置いて、絶対進化末期の星からのジェットに違いないと最後まで譲りませんでした⁵⁾。彼女は、学会発表を最後に天文学研究を離れ専業主婦となっていました。W43A の正体についてさらに理解が進み、彼女のこの見識が正しかったのが証明されるのに、さらに 10 ヶ月を要するのです。

とにかく、私たち共同研究者らがあれこれ考えているうちに、私たちよりも先にこの観測結果の重要性を悟った人たちがいました。私たちは 2001 年 10 月にネイチャーへ論文を投稿したのですが、論文掲載に好意的だった二人のレフェリーはまさにその中に含まれます。ただし、論文で記述した観測結果に対する私たちの解釈については、“strongly disagree” だということごとく反論してきました。分子ガスジェットの形成メカニズムの解明は今後の課題だとまとめるとしても、W43A の星としての進化段階に関する記述、さらにはこのジェット発見が示唆する恒星進化についての新知見、これらをきちんと考え直してレフェリーを説得しなくてはいけません。また、ネイチャーの編集者陣も論文受理に関しては意見が分かれていて、二度目の審査をパスできなければ三度目はないとも覚悟しました。

6. W43A の一酸化珪素メーザー

そんなある時、野辺山 45m 電波望遠鏡を使って別の研究を共に進めていた中島淳一さんと出口修至さんにネイチャーへの論文投稿の事情を知らせ、どうまとめたら良いか相談したことがありました。私たちの発見を知った彼らは、内心穏やかでは済

まなかったかもしれません。彼らは、赤色巨星のような規則的な変光と激しい質量放出を伴う「漸近巨星枝 (asymptotic giant branch, AGB) 星」と、質量放出が止まり星表面が高温になる白色矮星へ進化して惑星状星雲を周囲に形成していく過程の段階にある天体 (post-AGB 星) と、これら2段階の間にある天体、原始惑星状星雲、をまず探し出し、その特徴を把握しようとしていました。その研究戦略として、原始惑星状星雲と既に同定されている天体の中からさらに一酸化珪素メーザーが観測される天体を探索していたのです。進化末期の星には上記水蒸気・水酸基メーザーの他に、一酸化珪素メーザーが観測されます。前者らよりも星の表層近くに存在し、星からの質量放出が止まると前者らよりも先に消えてしまうと考えられます。私たちが論文をまとめている最中、彼らもまた着々と観測を進め、激しい質量放出が止まる直前の原始惑星状星雲の候補を見つけ、それらに研究の的を絞りつつありました。そう、彼らが新たに発見した一酸化珪素メーザー源のうちの1つが W43A だった訳で⁷⁾、結果的に彼らが目指したゴールを先取りしてしまった形となりました。

しかし一酸化珪素メーザーが検出されたというだけでは、W43A の進化段階を断定することはできません。確かに、このメーザーのほとんどは質量放出が続いている赤色巨星で見つかっています。しかし例外的に大質量星形成領域 (オリオン座 KL 領域・射手座 B2 領域・W51 North 領域) でも見つかっているために決め手になりません。

7. 変光する W43A の水酸基メーザー

天体までの距離と天文学者の行っている定量的評価は、多くの場合精度が1桁しかありません。W43A についても論文記述の定量的精度を上げるべく、W43A までの距離に関する文献を探し続けていました。そこで思い付いたのが、水酸基メーザーを使った直接距離推定法です。水酸基メーザーは、ほぼ球対称に膨張する星からのフローに付随

して、さらに星の変光に伴いメーザー強度も変化することが良く観測されています。手前に来るガス、遠ざかるガス、それぞれに付随するメーザースポットの間で観測される強度変化の時間差 (膨張フローの直径/光速) と、電波干渉計を用いた撮像から計測される実際のスポット分布の直径を比較すれば、その水酸基メーザー源の距離が分かります。上記のような観測についてはしばらく耳にしていなかったのですが、W43A でも観測が行われているのだろうか、すぎる思いで過去の文献を探していき、別名 OH 31.0 + 0.0 でとうとうその記述を見つかることができました⁸⁾。上記のようにメーザーが変光しているのだから、間違いなく W43A は規則的に変光している赤色巨星だ! この知らせを聞いたダイヤモンドさんもまた、「その論文の著者と当時一緒に仕事をしていたけれども、そんなことすっかり忘れていたよ! 自分はなんて間抜け (silly) なんだ!？」と言っていました。

8. 漸近巨星枝 (AGB) 星からの分子ガスジェット

結局、目を見張るべきポイントとして見つかった事実は、W43A からの分子ガスジェットが脈動変光と激しい質量放出を行っている AGB 星から見つかったということです。惑星状星雲などでは既に幾つかの可視光ジェットが見つかっていました。もともと星はとても球に近いのに、そこから形成されていく惑星状星雲は複雑な形や運動を持っています。一体これらはどうやって形成されたのだろうか? 連星系からのジェットだ、いや、星からの紫外線の遮蔽具合だ、磁場の効果も忘れちゃあ困る。2001 年 11 月、オーストラリア・キャンベラで開かれた国際研究会では、研究者たちがこのような持論を言いたい放題ぶちまけていました⁹⁾。それを尻目に、メキシコ自治大学のヨランダ・ゴメスさんと私は、自分たちの観測結果をじっくり見比べていました。彼女らは、星周ガスの電離が始まってわずか 30 年足らずの天体 (K3-35) を発見してお

り、その天体には既に年齢（～広がり／仮定膨張速度）1000 年程度のプラズマ電波ジェットが見えていました¹⁰⁾。一方私たちが見つけた W43A からの分子ガスジェットの年齢は、わずか 28 年程度です。お互いの観測天体が似たような質量の星だと仮定すれば、まず私たちが観測したような分子ガスジェットが形成され、そのおよそ 1000 年後に分子ガスジェットがそのまま電離されて、彼女たちが観測したような電波ジェットの存在が説明できます。最も激しい質量放出現象（スーパーウインドと言われることもある）もちょうどこのタイムスケールくらいの期間続くので¹¹⁾、惑星状星雲の形や運動は、その中心星が白色矮星になるずっと昔の AGB 星段階でもう決まってしまう、こんな結論に達することができたのでした。

9. エピローグ

こうして、ネイチャーに投稿した論文は 3 回目に受理されました。その頃には私は、新天地であるオランダの JIVE で研究と業務を始めていました。論文受理通知の際の喜びは束の間で終わり、全く聞き慣れない英語での業務指示に意識を集中する日々が続いています。4 月の中旬、データを得た VLBA のホストである米国国立電波天文台 (NRAO) で記者会見をするための準備が始まりました。「記者会見時に配る参考資料のタイトルとして、“Water Fountains in the Sky” (宇宙の噴水) かどうか」。デイブ・ファインレイという NRAO 広報担当の方から、そのような提案が伝えられました¹²⁾。語り種にはもってこいであるこのネーミングを私はとても気に入る、この記事のタイトルにもそのままこれを採用しました。

銀河系の中には 1,000 個以上の水蒸気レーザー源がありますが、「噴水」の候補は今のところあとわずか 2 つしかありません¹³⁾。噴水自体が AGB 星からどうやって作られるのか、これらの天体についてさらにじっくりと調べると共に、他にも噴水の候補が存在しないか（どれくらい稀な現象なのか）

探査をすることが、今後重要となるでしょう。一方 W43A の研究にはさらに続きがあるのですが、これらについては後日また紹介しましょう。

謝 辞 :

本文中で紹介した方々からの本研究への理解と助言そして協力なくして、本文中で紹介した成果を挙げるができなかったと思います。ここで改めて感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Imai H., Obara K., Diamond P.J., Omodaka T., Sasao T., 2002, *Nature* 417, 829
- 2) 例えば、今井 裕, 2000, 天文月報, Vol. 93, No.6, 307
- 3) Diamond P.J., et al., 1985, *MNRAS* 212, 1
- 4) Diamond P.J. & Nyman L.-A., 1988, in *VLBI and its Impact on Astrophysics*, eds. Reid M.J., Moran J.M. (PASP, San Francisco) p.249
- 5) 小原久美子, 2001 年, 鹿児島大学修士論文
- 6) 例えば、野口悠紀雄, 2000, 「超」発想法, (講談社) ISBN: 4062 099918, 第 3 章
- 7) Nakashima J., 2002, Ph.D. thesis, the Graduate University for Advanced Studies
- 8) Herman J., Habing H.J., 1985, *A&A* 59, 523
- 9) 今井 裕, 2002 年, 天文月報, Vol. 95, No. 3, 150
- 10) Miranda L.F., et al., 2001, *Nature* 414, 284
- 11) Lewis, B.M., *ApJ* 560, 400
- 12) URL: <http://www.aoc.nrao.edu/epo/pr/2002/w43a>
- 13) Likkell L., Morris M., Maddalena R.J., 1992, *A&A* 256, 581

A "Water Fountain": Discovery of a Molecular Jet from an AGB Star

Hiroshi IMAI

Joint Institute for VLBI in Europe, the Netherlands

Abstract: We discovered a highly collimated jet of molecular gas from an OH/IR star, W43A, on basis of VLBI observations of water vapor masers. The existence of a fast jet associated with a Mira-type pulsating star implies that an elongated planetary nebula has been formed during the short period (< 1000 years), when the star makes its transition through the final stage of the asymptotic giant branch (AGB) to become a central star of a planetary nebula.