

# 銀河系中心ブラックホールを回る星の動きをALMAで見る

坪井昌人(JAXA宇宙研)\*、  
堤 貴弘(米国国立電波天文台)\*、  
宮崎敦史(日本宇宙フォーラム)、  
三好 真(国立天文台)、  
宮脇亮介(桜美林大)\*



坪井昌人



宮脇亮介

\* 記者会見参加者



堤 貴弘

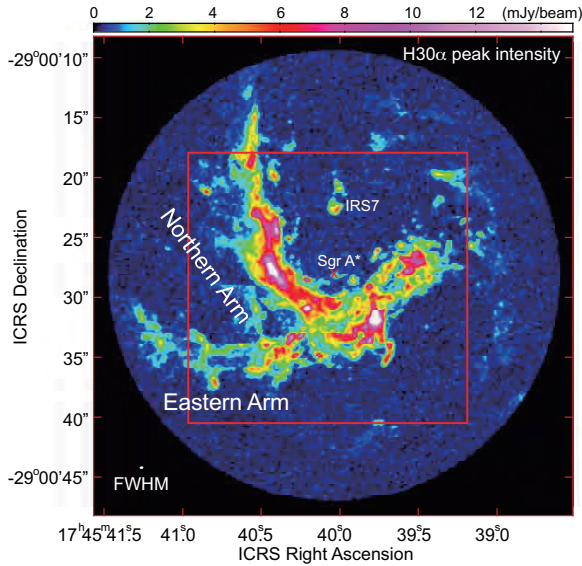
## 銀河系中心とは

銀河系(天の川銀河)は我々の住む銀河であり、小さな棒状構造を持つ渦巻銀河である。その中心が銀河系中心と呼ばれ、いて座の方向にある。中心には約 $4 \times 10^6$ 太陽質量の巨大ブラックホールがある。そして、このブラックホールに対応する電波源がいて座A(SgrA\*)である。

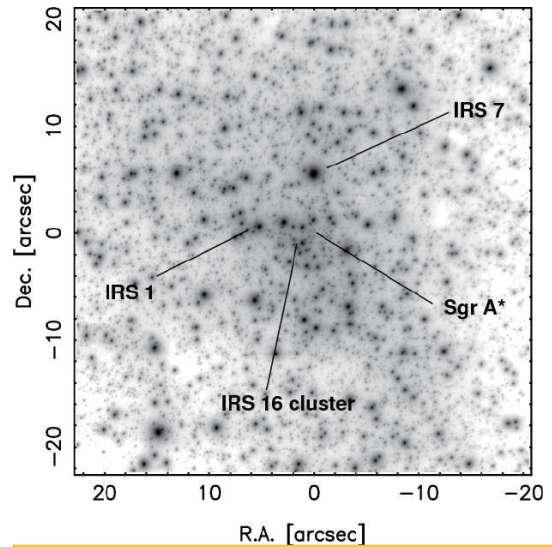
銀河系中心は太陽から約26000光年離れている。それでも最も近い銀河の中心領域であり、渦巻銀河の中心に共通に見られるはずの固有の構造や現象を研究するための『実験室』になっている。

我々の研究では銀河系中心のブラックホール周辺をチリ・アタカマ砂漠に国際協力で建設されたミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)の最高分解能で観測して、その周囲の天体の運動を明らかにしたものである。

電波望遠鏡はガスを見るのは得意であるが恒星の観測は苦手だった。



ALMAで見た銀河系中心(SgrA\*)の周囲の電離したガスの様子 (分解能0.4")

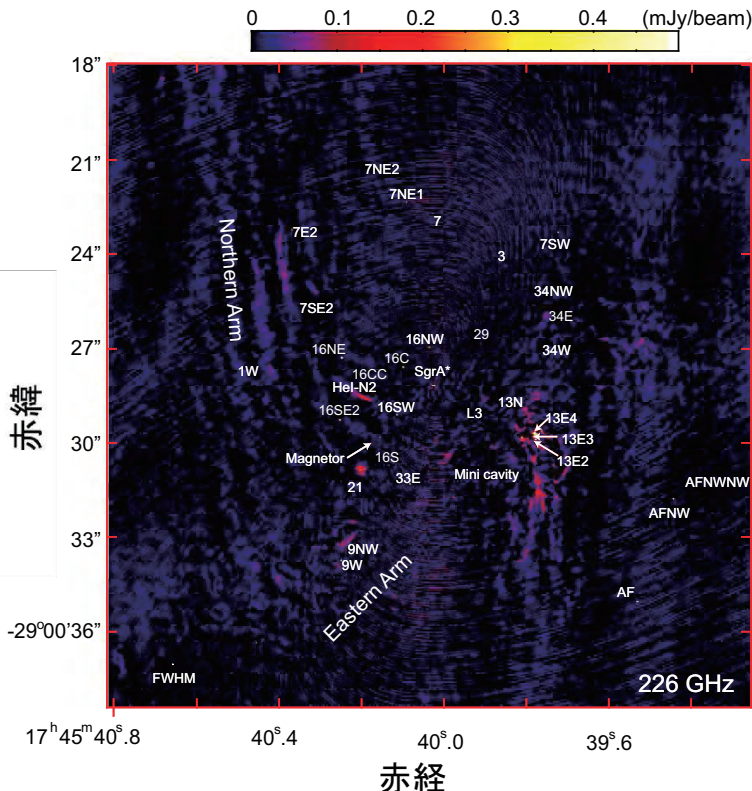


赤外線で見えた銀河系中心(SgrA\*)の周囲の星の様子(Schodel et al 2009)

電波望遠鏡はガスを見るのが得意である。銀河系中心の周りの電離ガスは何本ものアーム状の流れに分かれて回っていることが30年前から明らかになっていた。しかし、今までは恒星を直接観測することは近距離の星を除いてできなかった(左図)。一方、赤外線では銀河系中心の周りを回っている恒星を観測することは比較的容易であり補償光学技術を用いて大気によるゆらぎを除いて撮像観測をすることもできた(右図)。しかし、SgrA\*自体は弱く、フレアが起こる場合しか観測できず、代わりに赤外線で見やすいIRS7を基準に星の位置を測定していた。

左図の赤枠を国際協力でチリアタカマ砂漠に建設された電波干渉計ALMAの最高分解能で見る。

ALMAの高感度高分解能観測は銀河系中心で恒星を検出できる。



恒星から熱放射の強度は波長2乗に反比例をするので、赤外線より波長の長いミリ波サブミリ波帯では放射は弱くなり、検出することが難しかった。また角度分解能も波長に比例してわるくなる。角度分解能が足りないと放射が薄まってしまう、検出することがさらに難しくなる。

しかし、ALMAは桁違いの高感度と高分解能を持つため、恒星の検出が可能となった。

左図は我々の2017年の観測結果である。周波数は226 GHz (波長約1mm)である。25ミリ秒角の高分解能と0.05mJy/bの高感度(Sgr A\*の5万分の1)が実現されている。銀河系中心(SgrA\*)の周りを回っている恒星を検出することができた。

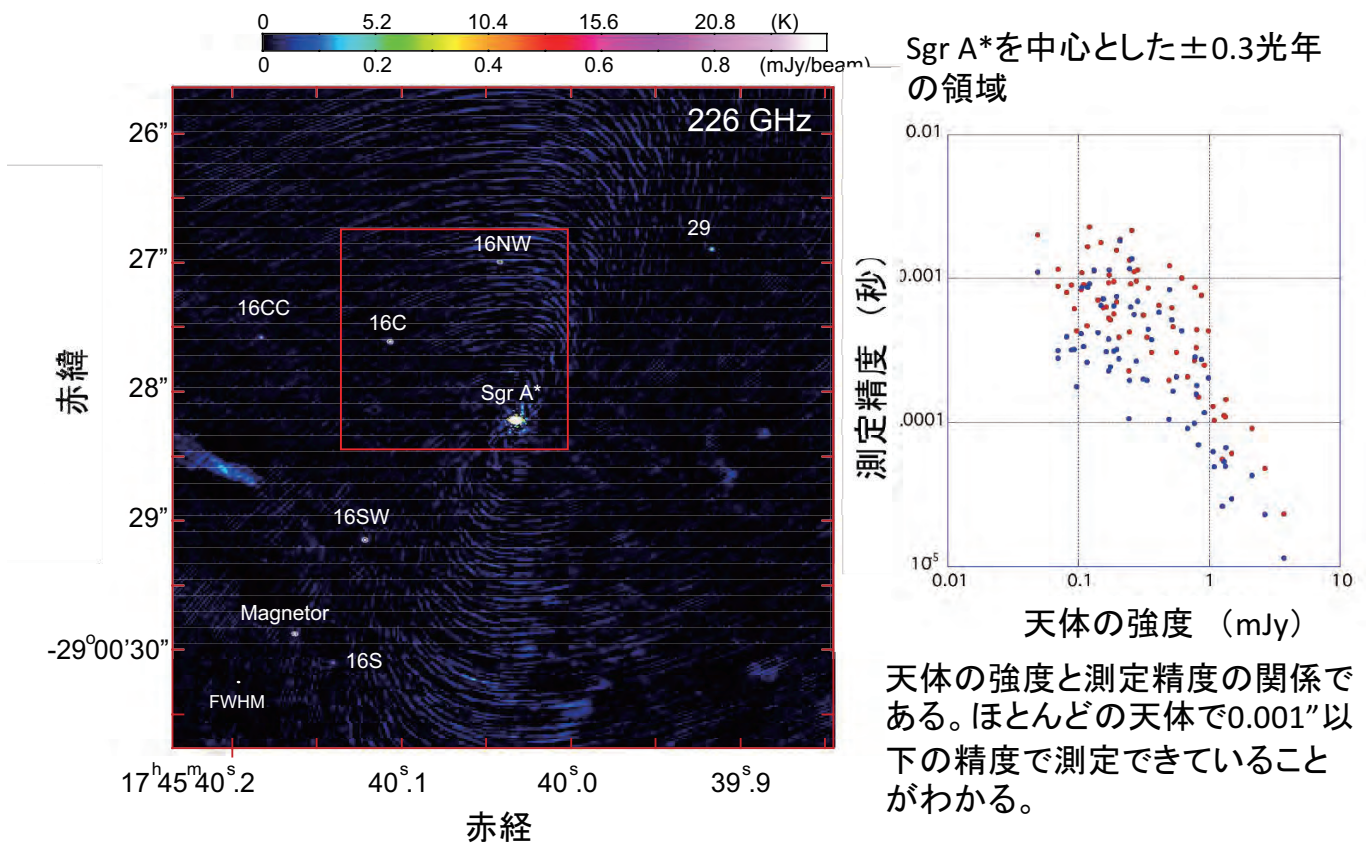
ここで検出された天体は約70個であり、そのほとんどが大変明るい恒星であるウォルフライエ型星とO型星である。

ただしIRS7は例外で赤色超巨星である。

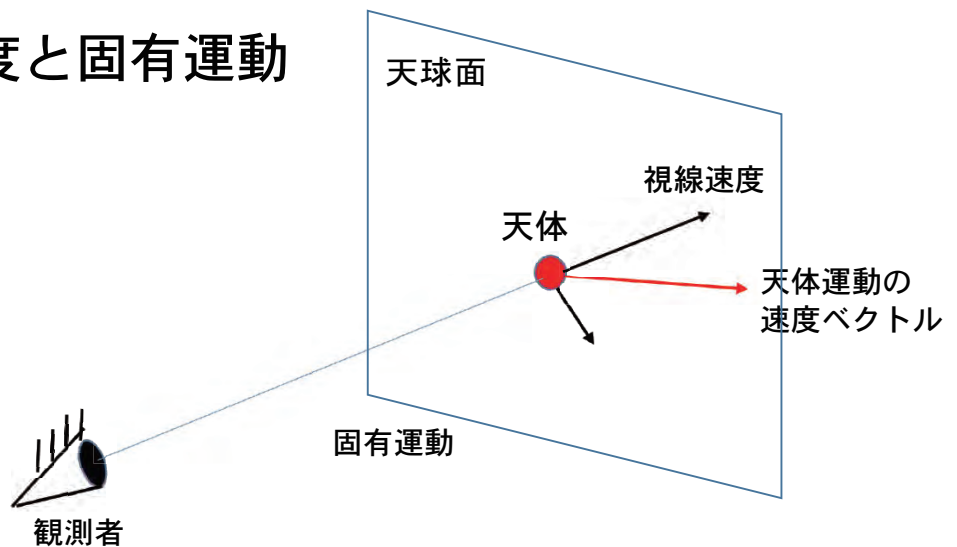
前ページの赤枠の範囲をALMAの最高分解能でみた結果。

## 銀河系中心(SgrA\*)の周りを回っている恒星(拡大図)

ALMAでは1回の観測で銀河系中心に対する恒星の位置を遠方の天体を基準として0.001"以下の精度で測定できる。



## 天体の視線速度と固有運動

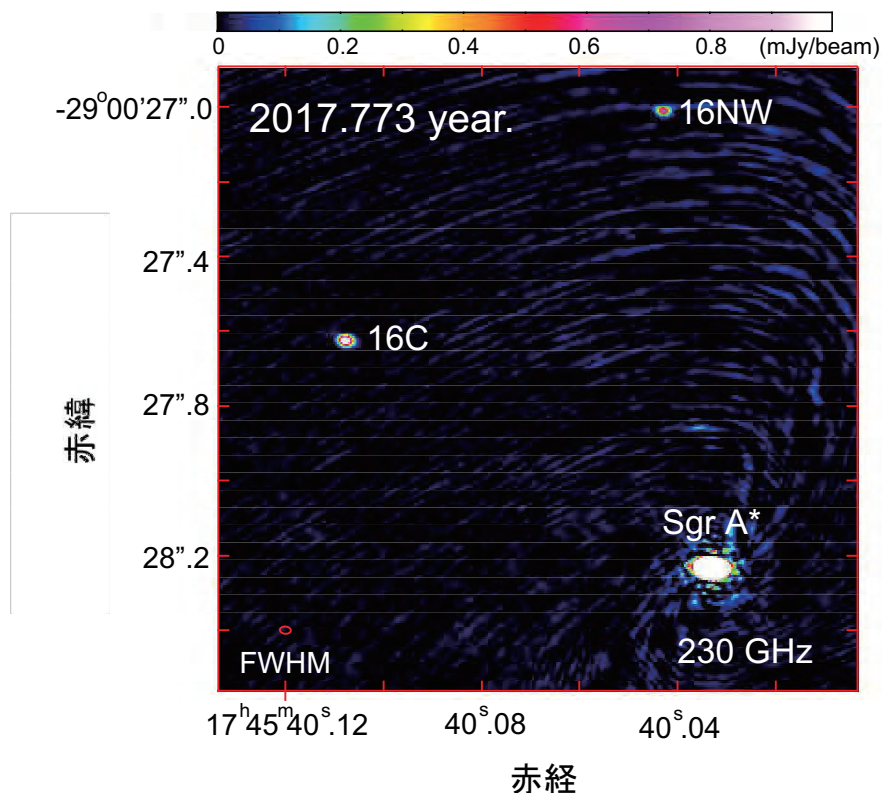


天体が運動している場合、

- 1) 視線方向の運動はドップラー効果で線スペクトルの波長がずれることにより、**視線速度**として観測することができる。
- 2) 視線と垂直の運動(天球面上の運動)は天体の位置を複数回以上測定して、その変化から**固有運動**として観測することができる。

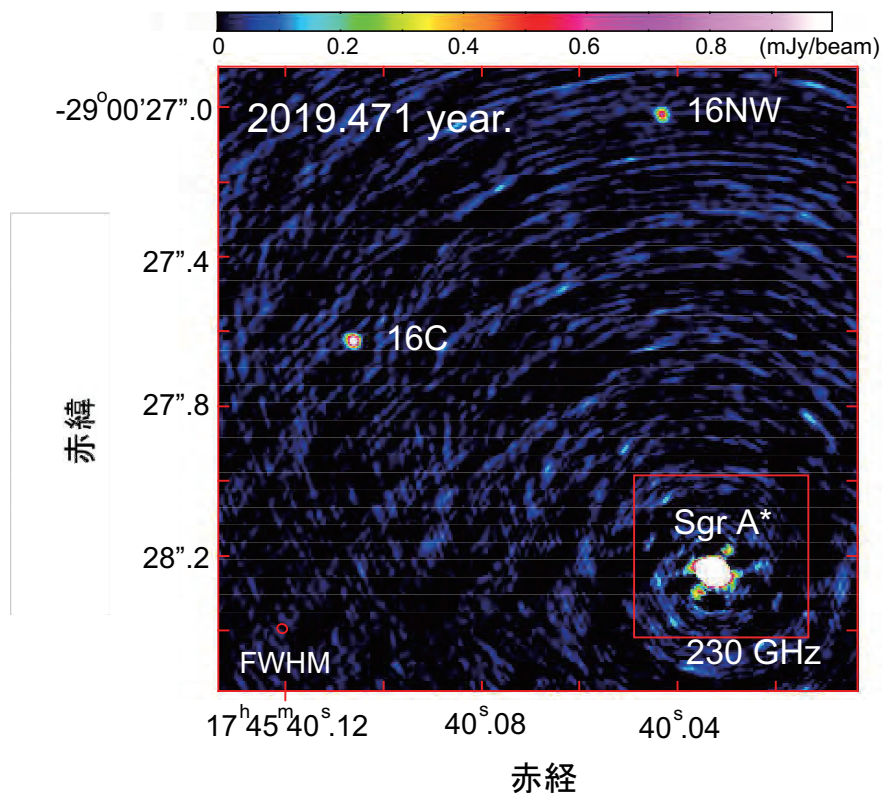
このほかの天球面上の運動として地球が太陽の周りを公転することによる**年周視差**とその相対論的効果である**光行差**がある。しかし年周視差は銀河系中心で最大0.13ミリ秒となり測定誤差よりも小さい。光行差はとても大きいと同じ方向にある天体では同じ大きさになるので、近くの天体を基準とする場合はこれも測定誤差よりも十分小さい。

銀河系中心領域の固有運動の実例: 星は天球上の位置を変える。



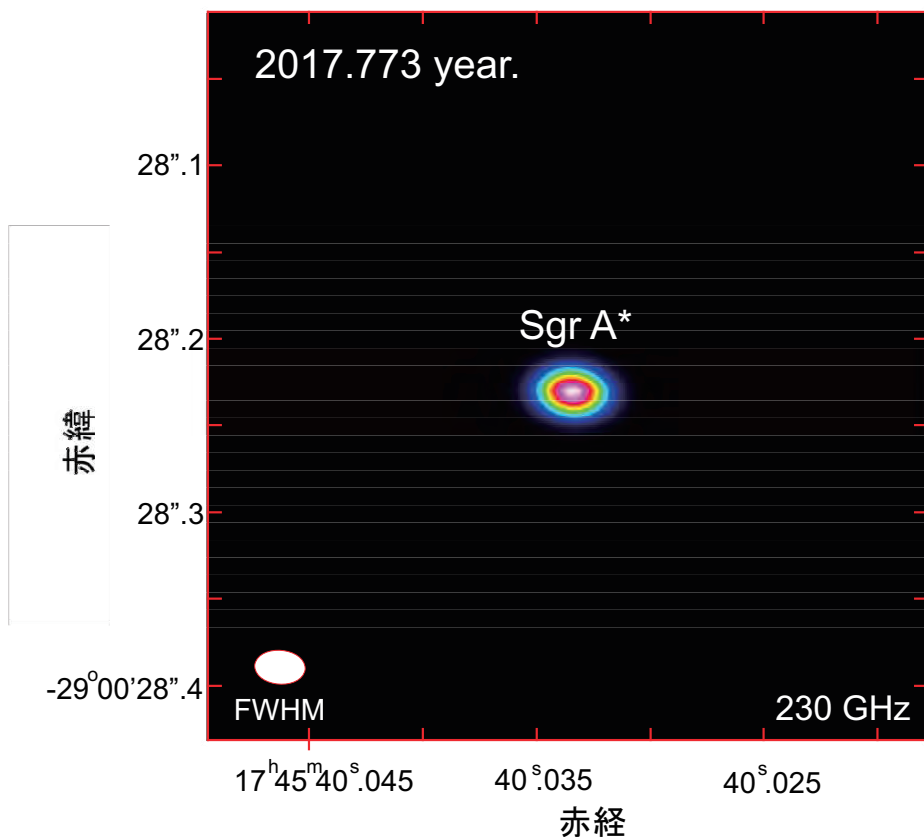
2019年にもALMAでは米国チームによって同様の感度と角度分解能を持った観測が実行されていた。この春、1年間の占有期間を経て生データが公開された。

銀河系中心領域の固有運動の実例: 星は天球上の位置を変える。



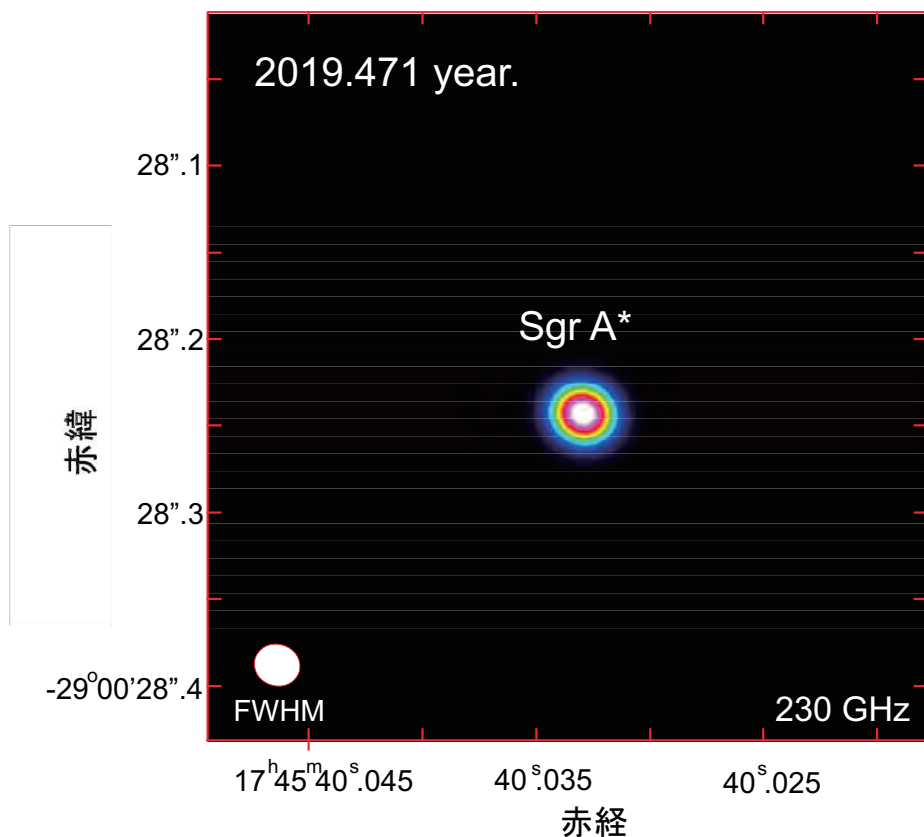
16NWは南に、16Cは西に動いていることがわかる。

銀河系中心領域の固有運動の実例: Sgr A\*も銀河回転のため天球上の位置を変える。



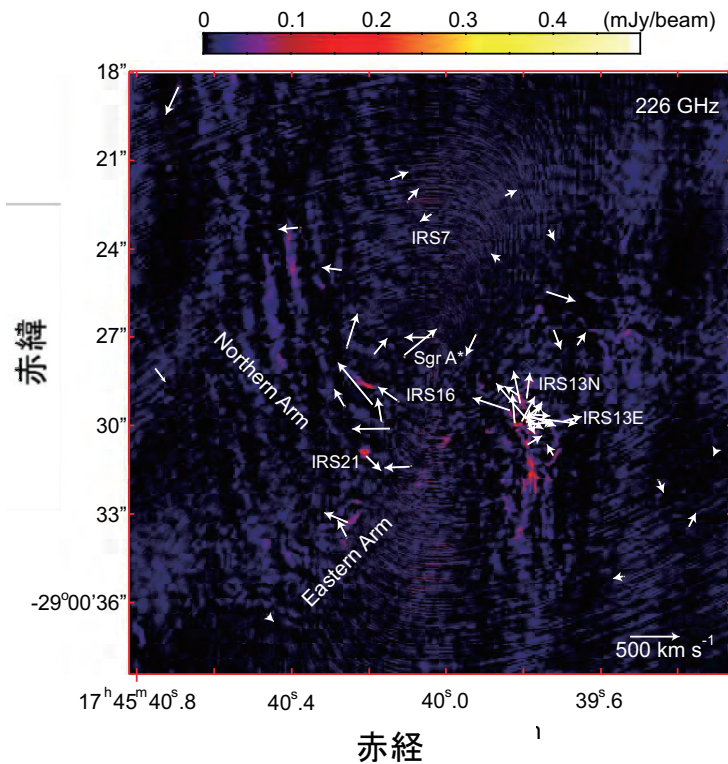
星の固有運動から銀河系中心の固有運動を差し引くと銀河系中心の周りの星の運動を導くことができる。

銀河系中心領域の固有運動の実例: Sgr A\*も銀河回転のため天球上の位置を変える。



星の固有運動から銀河系中心の固有運動を差し引くと銀河系中心の周りの星の運動を導くことができる。

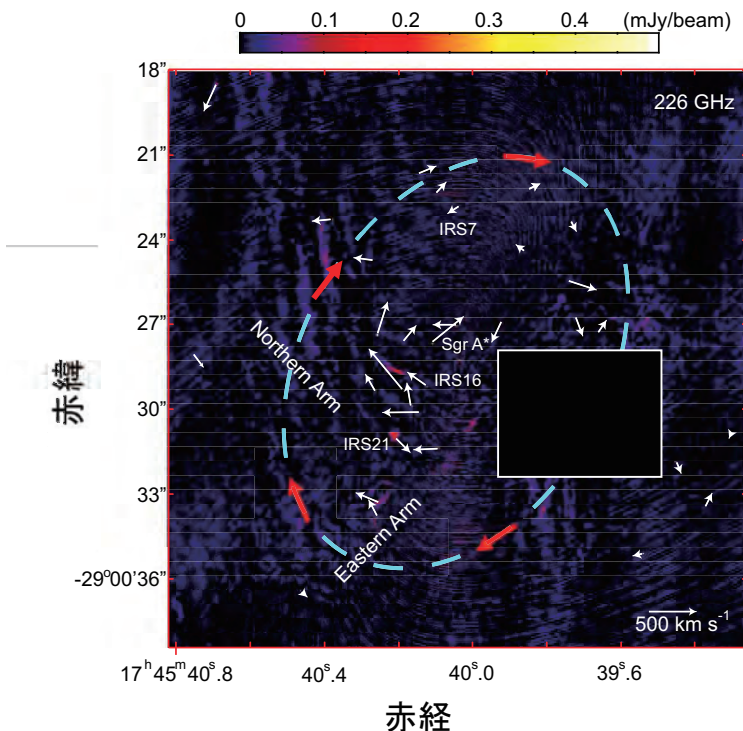
ALMAでは1回の観測で銀河系中心に対する恒星の位置を0.001”以下の精度で測定できる。



2017年と2019年のALMAの観測での恒星のSgr A\*に対する相対位置を比較すると、銀河系中心ブラックホールに対する星の固有運動を求めることができる。

- 1) 左図の白い矢印がその固有運動である。数10～数100km/sの激しい運動をしていることがわかる。
- 2) 星の運動はランダムであるわけではなく、いくつかに分類できるようである。
- 3) 有名な星団であるIRS13E星団やIRS13N星団ではそれぞれ揃った動きがあることもわかる。

## 1) 銀河系中心のまわりを時計方向に回転する星の集団



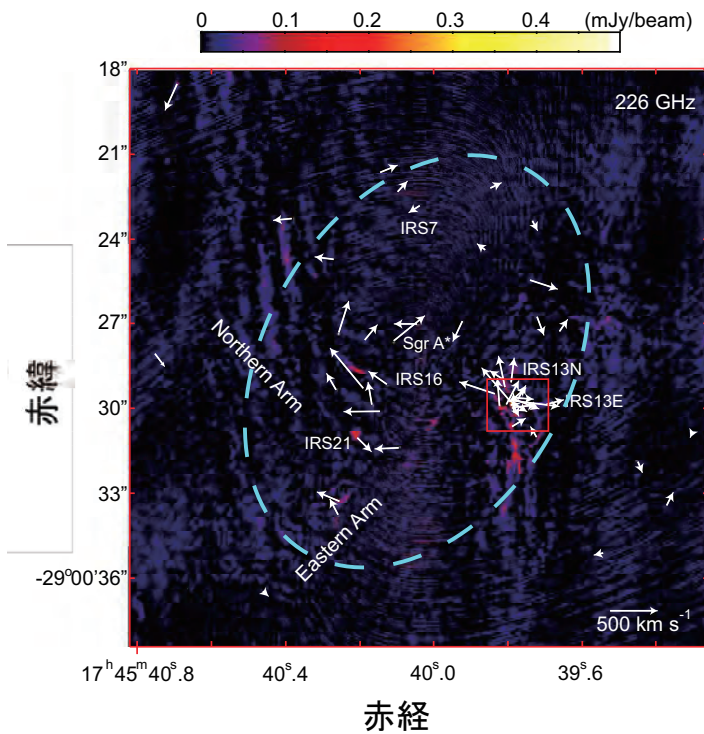
左図はIRS13E星団, IRS13N星団での固有運動を隠した周囲にちらばった星の固有運動である。

特に青い楕円の中がこの傾向が顕著であるが多くの星は銀河系中心ブラックホール(Sgr A\*)のまわりを時計方向に回転しているように見える。

このSgr A\*の周囲を時計方向(赤矢印の方向)に回転する星の集団の存在は長年にわたる赤外線観測から言われて来たものであるが、ALMAでは、わずか1年半しか隔ていない2回の観測で確認することができた。

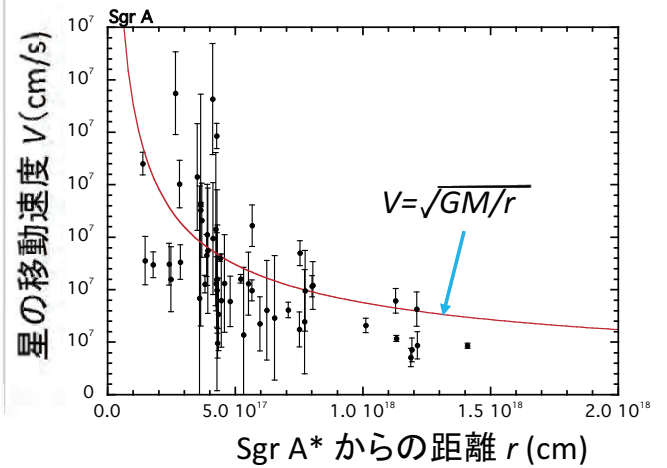
ALMAが位置観測について強力な観測装置であることがわかる。

## 1) 銀河系中心のまわりを時計方向に回転する星の集団



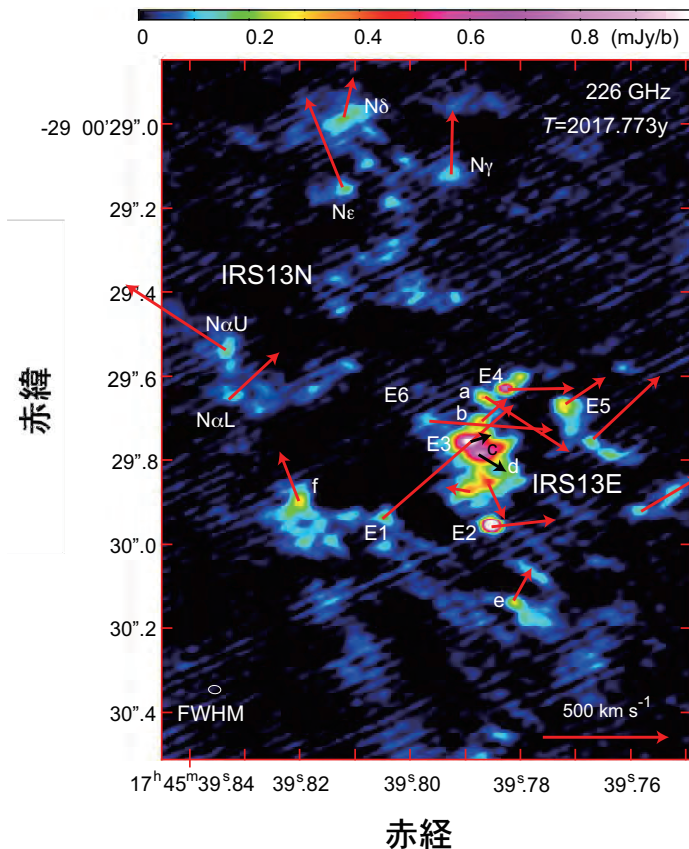
また、これらの星が銀河系中心の周囲を円軌道を描いて運動している（ケプラー運動）と仮定すると、銀河系中心の質量を導出できる。

下図の赤線がデータに当てはめた曲線である。これをもとに導出された質量は  $M=4 \times 10^6$  太陽質量であり、これまでの測定値と矛盾がなかった。



次にIRS13E星団を詳しく見る。  
(図中の赤四角)

## 2) 応用例：IRS13N星団, IRS13E星団中の天体の運動



銀河系中心に最近傍の星団であるIRS13N星団、IRS13E星団中の天体の運動を詳しく見てみる。

IRS13N星団中の天体は北に向かって揃って運動していることがわかる。この運動は銀河系中心(SgrA\*)に対しては反時計まわりの運動となる。速度はおおよそ300km/sである。

またIRS13E星団中の天体の運動は西に向かって揃って運動していることがわかる。速度はおおよそ250km/sである。

一方、IRS13E星団方向に見えるガスの塊であるE3,c,dなどの運動は星団全体の運動に一致していないようである。

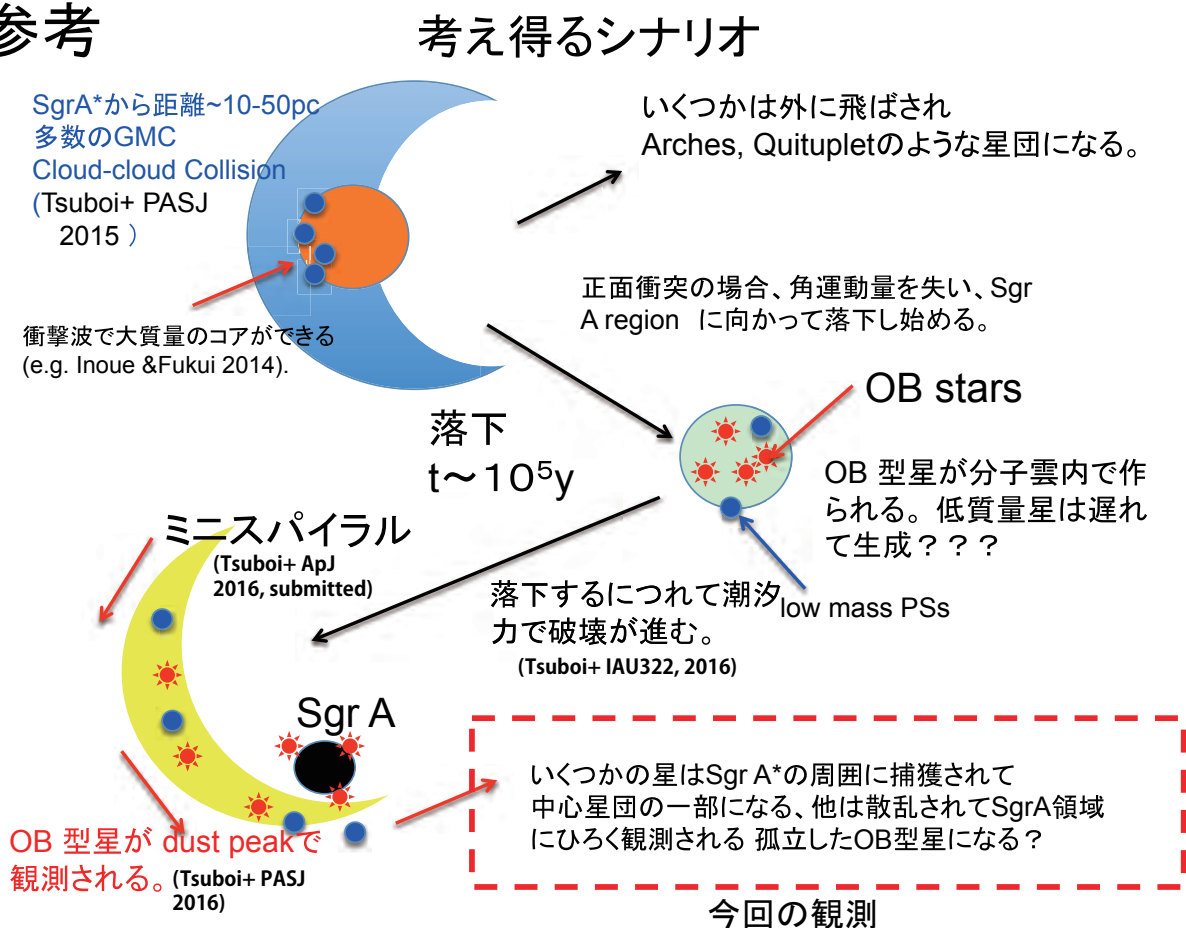
これらの運動速度はこの距離での円軌道の上限速度300~360km/sに近いが長円軌道での上限速度600~700km/sよりは十分に小さい。これらの星団は長円軌道を持っているのかもしれない。

すなわち星団は現在の位置より銀河系中心からより遠方で（一度に??）生成されてから銀河系中心に近傍に落ちて来た可能性がある。

## まとめ

- (1) チリ・アタカマ砂漠に国際協力で建設されたミリ波サブミリ波干渉計ALMAの最高分解能で銀河系中心を観測して、中心のブラックホールまわりの恒星をミリ波で初めて検出することに成功し、その位置を**0.001"以下の精度で測定できた。**
- (2) 2017年、2019年の2回の観測データから、ブラックホールまわりの恒星の固有運動を明らかにした。これらの恒星は数10~数100km/sの激しい運動をしているが、全体としてブラックホール周りを「公転する」ように動いていることがわかった。この固有運動をもとに求めたブラックホールの質量は約400万太陽質量で今までの観測値に一致した。**ALMAが位置観測について強力な観測装置であることを証明した。**
- (3) 応用例：銀河系中心に最も近い星団内の天体を詳細に観測することもできた。星団は現在の位置より銀河系中心からより遠方で（一度に??）生成されてから銀河系中心に近傍に落ちて来た可能性がある。

## 参考



## 星の最終進化始まりの合図を発見

### 会見参加者

甘田 溪 (鹿児島大学 大学院理工学研究科理学専攻),  
今井 裕 (鹿児島大学 大学院理工学研究科附属天の川銀河研究センター/  
総合教育機構共通教育センター)

### 共同研究者

甘田 溪, 今井 裕, 濱江勇希, 中島圭佑, 沈 嘉耀 (鹿児島大学), Daniel Tafoya (オンサラ天文台),  
Lucero Uscanga (メキシコ自治大学), José Francisco Gómez (スペイン高等技術研究院),  
Garbor Orosz (タスマニア大学), Ross Burns (国立天文台/韓国天文宇宙科学研究院)

我々は、太陽程度の質量を持った星が、その最終進化形である惑星状星雲へ進化し始める合図となる新たな電波放射の出現を国立天文台野辺山45m電波望遠鏡を使った観測により発見しました。

### [研究の背景]

恒星は、その進化末期において太陽の数100倍にも膨張し、星自身が脈動変光しながら、星表面から激しく物質を放出します。特に太陽程度の質量を持った星は、星中心の芯だけを残し、外層の物質を星間空間に放出します。そして最終的に、この芯は白色矮星に、外層の物質は惑星状星雲に進化することにより、星はその一生を終えます。この物質放出は、一般的に、星を中心に四方八方へとなされます。

ところが、中には、ガスを双極方向へジェット状に高速噴出しつつ終末を迎えつつある星も存在

します。このような天体のうち、ジェット中を移動する高速な水分子からのレーザー放射（注1）を用いて発見されている天体は、「宇宙の噴水」と呼ばれています（図1がその1例）。数千億個の星を擁する天の川銀河の中で、「宇宙の噴水」天体はたった15個しか見つかっていません。

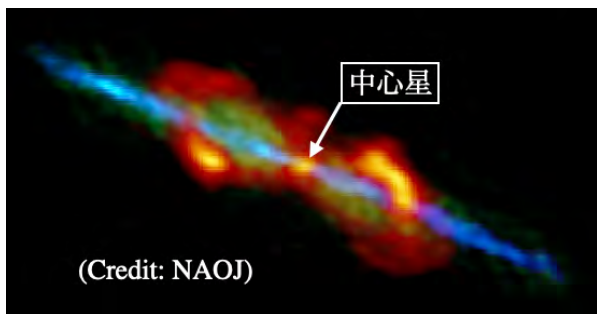


図1: 「宇宙の噴水」の1つであるW 43Aに付随する高速双極ジェット(青)とジェットに貫かれた星周物質(赤)。

太陽程度の質量を持つ2つの星が連星系（双子星）を成している場合は、進化の途上でこのような双極ジェットを噴出する天体になるであろうと考えられる様になりました。もしそうだとすると、このような天体として観測できる期間は、これら恒星の寿命に比べて極端に短い（100年未満）はずです。

この「宇宙の噴水」天体は、典型的な進化末期の星と比べて、極めて激しく物質を星間空間に放出しているという点も大きな特徴です。そのため、このような天体は、「進化末期の星が物質を星間空間に放出し、その物質からやがて星が生まれ、その星がまた物質を放出し...」という宇宙の物質循環や天の川銀河の物質進化に極めて大きく寄与していると考えられています。したがって、この「宇宙の噴水」天体の物質放出メカニズムやその進化状況の理解は、我々が属する天の川銀河が今までにどのような進化を遂げてきたのか、また、これからどのような進化をしていくかの解明に繋がることを期待されます。

一般的な進化末期の星では、水メーザー以外に一酸化ケイ素メーザー源が星の直近で光っており、星からのガス放出が続いていることを示してくれます。しかし、この「宇宙の噴水」天体の中ではたった1天体でしか一酸化ケイ素メーザーは検出されていませんでした。しかも、その天体（図1で示されているW 43A）の一酸化ケイ素メーザーは現在消えてしまっており、このような天体の中心星近傍の情報をつかむ手がかりを失ってしまっていました。そのこともあり、中心星表面付近のどこからどの程度の勢いで双極ジェットが放出されるのか、数億年から数10億年の寿命を持つ星が最終進化を遂げる期間（数10万年間）のうち最も勢いのあるジェットが放出されるタイミングとその継続期間について、これらの状況についてはあまりわかりません。

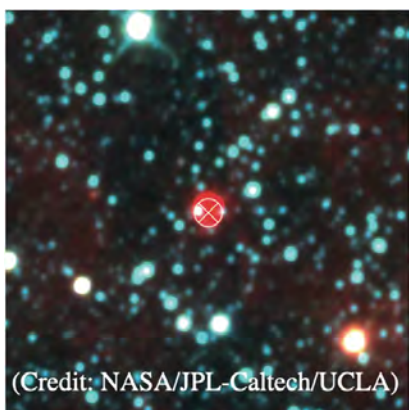


図2：新一酸化ケイ素メーザーを検出したIRAS 16552-3050の赤外線画像（中心の赤い天体）。中心の十字印とその周りの円は、野辺山45m電波望遠鏡の視野中心と視野の大きさです。

### [観測結果]

我々は先に、国立天文台野辺山45m電波望遠鏡に水と一酸化ケイ素メーザーを同時観測できるシステムを開発していました。そこでこのシステムを使って早速、2018年12月からこれら「宇宙の噴水」天体らの監視観測を始めました。鹿児島大学から遠隔で望遠鏡を操作できるようになったお陰で、冬季-春季にかけて同じ天体を毎月監視する様な観測が実現しました。

観測当初は、先述したW 43Aの一酸化ケイ素メーザーが復活するかもしれないと期待していましたが、こちらは消滅してしまっただけです。ところが意外にも、2021年3月になって、「宇宙の噴水」天体の一つであり、ちょうこくしつ座の方向の太陽系から約27光年の距離にあるIRAS 16552-3050という天体（図2）の方で新たに一酸化ケイ素メーザーが出現したことを確認できました（図3）。過去に一度（2011年）観測された時には見ら

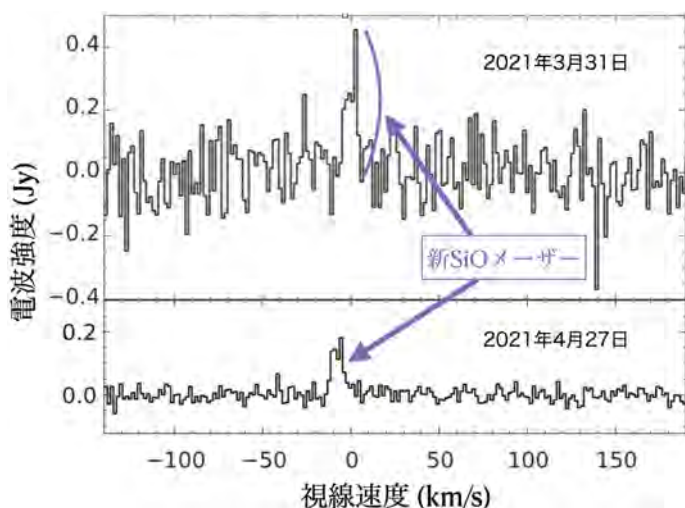


図3：2021年3月と4月に検出した、IRAS 16552-3050に付随する一酸化ケイ素メーザーの電波スペクトル。横軸は、ドップラー効果を考慮して観測周波数から換算された視線速度を表します。(Credit: 甘田溪ら研究チーム)

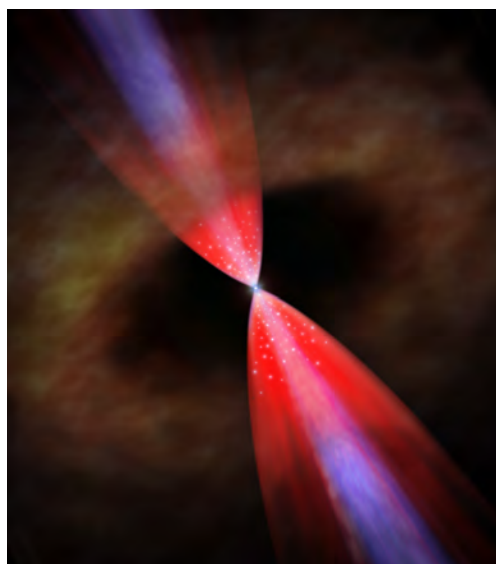


図4：IRAS 16552-3050の中心星近傍のジェット噴出口とそれに付随する一酸化ケイ素メーザーガス塊の想像図。図の方角は、上が北、左が東である。ジェットの噴出方向は、北東側が地球から遠ざかる方向で、南西側が近づく方向です。(Credit: 木下真一郎)

れなかったので、今回新たに出現したものと考えられます。W 43Aの消えてしまった一酸化ケイ素メーザーがジェット噴出口にあるノズル構造に付随していたことと、このメーザーとスペクトル上での特徴が似ていることから、IRAS 16552-3050の星の直近から今まで確認されてきた以上の大規模ジェット放出が始まり、そのジェット放出したガスが元々あった星周物質を激しく貫通したことによって、一酸化ケイ素メーザーが出現したと予想されます(図4)。そのため、この新一酸化ケイ素メーザーは、星自身が新たな進化段階に入ったことを示唆しています。

## [将来の展望]

我々は、新一酸化ケイ素メーザー源の位置を把握するための観測を計画しています。今回検出した一酸化ケイ素メーザーは、そのスペクトルの特徴から、図4の南西側に位置する一酸化ケイ素メーザー源からの放射であると考えられ、北東側に位置する一酸化ケイ素メーザー源からの放射は検出していません。もし、中心付近からガスが双極的に噴出しているのなら、北東側にも一酸化ケイ素メーザー源が出現すると考えられます。将来的に、野辺山45m電波望遠鏡をはじめ国立天文台のVERA望遠鏡や東アジア諸国の電波望遠鏡を一斉動員したVLBI（超長基線電波干渉法（注2、注3））観測を行い、今回検出した一酸化ケイ素メーザーの放射源が本当に南西側にあるのか、また、北東側に一酸化ケイ素メーザー源はあるのかどうかを、精密な画像の上で確認する予定です。その一酸化ケイ素メーザーの位置情報から、水メーザー源を伴うジェットと一酸化ケイ素メーザー源が付随するノズル構造によって駆動される質量放出のモデルを検証することができるようになります。

また、太陽程度の質量を持った星々のうち、もう1つの星を伴って連星系を成すものについては、この様な「宇宙の噴水」へと進化し、星質量の大部分をその時一気に放出すると考えられています。この事を確認する為には、この星そのものの性質をより正確に推定する必要があります。そこで、この一酸化ケイ素メーザー放射の強度変化をさらに監視し、中心星が他の終末進化する星々の様にまだ脈動変光しているかを確かめることも重要となります。この天体は、今後、中心付近から噴き出された大量のガスが確認され、そのガスがその周囲のガスとともに惑星状星雲へと進化していく様子をリアルタイムで追跡できることが期待されます。

（注1）メーザー：特定の温度・密度を保ったガス塊において、輝線放射が増幅される放射機構。そのような特殊なガス塊は偏在しているため、メーザー源は多数の微小スポットの集団として観測され、「宇宙の噴水」天体ではジェット中に多数の水メーザースポットが観測されます。

（注2）電波干渉法：複数の電波望遠鏡を組み合わせ、それらの電波望遠鏡で受信した信号を干渉させることで一台の巨大な電波望遠鏡を構成する方法。単一の望遠鏡と比べて、高い解像度や集光力を持ちます。

（注3）超長基線電波干渉法 (Very Long Baseline Interferometry; VLBI)：アンテナ同士の間隔（基線）が100 kmを超えるような電波干渉法のこと。基線が長いほどより高い解像度を実現できます。

謝辞： この研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号 16H02167)と鹿児島大学理工学研究科附属天の川銀河研究センターからの援助を受け、野辺山45m鏡共同利用観測(課題番号 BU185001, CG191001, CG201002)のデータを利用して行いました。