

VLBI将来計画WG 計画概要補足資料

2021年6月 第4版

VLBI将来計画ワーキンググループ

本資料について

本資料は VLBI 将来計画ワーキンググループによる検討結果をまとめた「VLBI 将来計画 WG 検討報告書」の補足資料である。

検討報告書には各検討班が科学的見地に基づき検討を重ねた国内の VLBI コミュニティが今後進めるべき研究の方針および計画の概要がまとめられている。また、同報告書で掲げている研究目標の達成に向け、多様な科学的トピックが提案されている。一方、報告書という性質上個々の科学的トピックに関しては、学術的課題を含めた研究の背景と研究の重要性、そして今後の研究の展望や実現可能性、そして周辺分野に対する波及効果などについて、それぞれの重要性に関わらず詳細を記述することはできなかった。

そこで、本資料では各科学検討班が提案した個々の研究テーマとそれらを推進する上での重要事項等について、詳細な内容を記述することで検討報告書を補足する。検討報告書においてまとめられている個々の科学テーマや研究方針の詳細に興味を持たれた際には、本資料を参照されたい。

2021 年 6 月

VLBI 将来計画ワーキンググループ
山口大学 新沼浩太郎

VLBI 将来計画 WG 計画概要補足資料

目次

	ページ番号
極限天体 WG 補足資料	1
地球・測地 WG 補足資料	12
星 WG 補足資料	23
銀河 WG 補足資料	61

補足資料：極限天体WG

VLBI から紐解くコンパクト星の誕生と進化

著者

赤堀卓也 (NAOJ/SKAO)、Eie Sujin (東京大学/NAOJ)、新沼浩太郎* (山口大学)、藤澤健太 (山口大学)

(*検討グループ班長)

ブラックホールや中性子星などのコンパクト天体は、本当に超新星爆発から生まれているのだろうか？これまでにブラックホールの起源としての超新星残骸を観測的に明らかにした例はなく、比較的若い中性子星でも半数近くで起源としての超新星残骸が分かっていない。そもそも今観測しているコンパクト天体は、いつ生まれたのだろうか？ブラックホールの年齢を推定することは非常に困難であり、中性子星の年齢推定にも不定性は大きく、年齢が100年を切る中性子星はまだ観測されたことがない。最後に、コンパクト天体を彩る多様性はどこからくるのだろうか？マイクロクエーサー・ジェットの変動の起源、マグネターの強磁場や爆発的な増光現象の起源など、明らかになっていない。このようにコンパクト天体の起源・進化・性質の理解は、発見から半世紀経ってもなお十分に進んでいない。宇宙の構成要素として主要な地位を占めるコンパクト天体の謎の究明は、次の時代の VLBI 観測こそが突破口を切り拓くべき、天文学・宇宙物理学の重要な課題と言えるだろう。

本課題に対する研究提案において、国内の VLBI 観測網における低周波観測システムの強化と、同システムを中心として用いた定常的な VLBI 観測の実施が重要になる。本研究提案では将来的に年間およそ 1800 時間の観測を見込んでいる。



図 1. 星の誕生と終焉およびコンパクト天体の起源と進化。コンパクト天体の起源と進化過程には未だ謎が多く、また振る舞いの多様性の起源も明らかにはなっていない。

1 中性子星の誕生と進化の研究

1.1 中性子星はどのように生まれ進化するのか？

【研究背景・目的】

中性子星はブラックホールと同様に大質量星の超新星爆発によって誕生すると考えられている。また、現在では観測的に見つかった中性子星は 2700 を超え、物理的な特性は非常に多様である。これらの中性子星について観測される回転周期 (P) と周期変化率 (\dot{P}) の関係で分類すると、いくつかの種族に分かれることが知られているとともに、中性子星の年齢 (特性年齢: $\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$) や中性子星における磁場強度 (スピンドアウン光度 = 磁気双極子放射光度を仮定し、 $B_d = 1.0 \times 10^{13} \text{ G} \left(\frac{P}{1\text{s}}\right)^{1/2} \left(\frac{\dot{P}}{10^{-13} \text{ s s}^{-1}}\right)^{1/2}$) を推定することも可能である (図 2 左)。

中性子星の進化を理解するためには、個々の中性子星の年齢を正しく推定すること、中性子星の生まれ故郷である親超新星残骸を特定しそれぞれの特徴を比較すること、が直接的な方法である。そのためにも特性年齢は重要な指標である。一方、親超新星残骸を特定したケースであっても、特性年齢が概ね 1 万年以下の中性子星 (若い強磁場パルサーやマグネター) では両者の年齢が数倍異なるケースが見られる (図 2 右)。また、そもそも生まれて間も無いにもかかわらず、周囲に対応すると思われる超新星残骸が見当たらないケースも多い。従って、このような若い中性子星を対象とし親超新星残骸の有無を調査することが重要である。統計的な見地で差異を見出すことができれば、「本当に中性子星は超新星爆発によって誕生するのか？」という根源的な問いに対し観測的な証拠を与えることができるはずである。

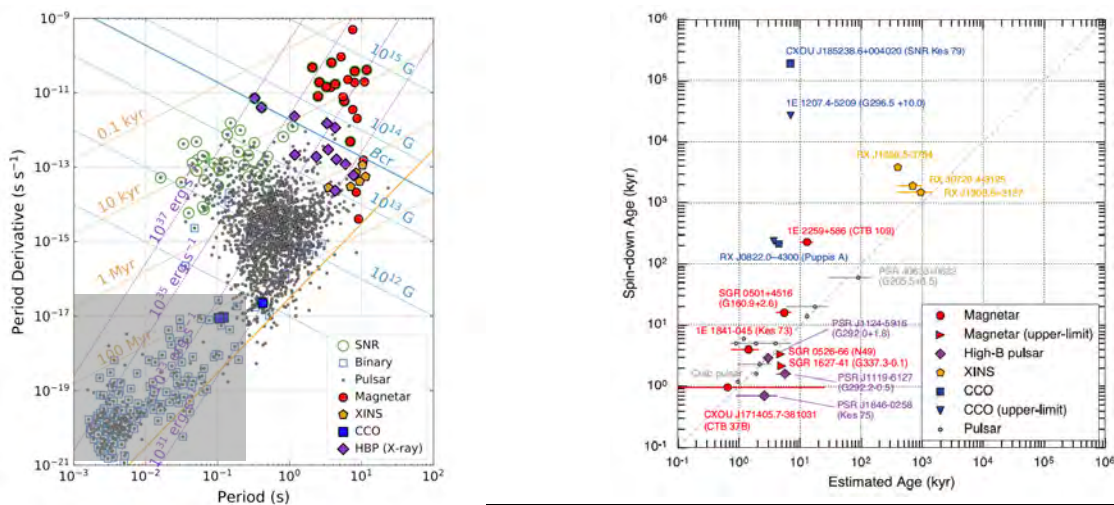


図 2. 左) 中性子星の回転周期 (横軸) および回転周期の変化率 (縦軸) の関係図。両者の関係から中性子星の年齢 (特性年齢: 黄斜線) および中性子星環境における磁場強度 (青斜線) を推定することができる。周期変化率の大きいものはより若く磁場強度も大きいことがわかる。灰色で網掛けした領域はほとんどミリ秒パルサーで、回転駆動型中性子星とは放射起源が異なると思われるため本研究の対象としない。右) 親の超新星残骸が同定されている中性子星において、超新星残骸の推定年齢と中性子星の特性年齢の関係を示した図。強磁場パルサー (HBP) やマグネター (MAG) においては、両者の間で数倍差のあるケースが見られることがわかる。(ともに Enoto et al. 2019 より)

また、多様性の理解のためには電波パルス放射の物理機構解明も重要な課題である。電波パルスの放射機構の理解のためには中性子星の強力な磁場強度は本質的な物理量であり、その起源を明らかにする極めて重要である。推定されている双極磁場の強度は、宇宙の様々な天体の中で最も強い磁場強度を与えるものの、直径 10^7 km とも言われる 10-20 倍太陽質量の星が直径 10 km の中性

子星に重力収縮するだけではマグネターの 10^{15}G に達するような磁場強度を実現することが難しいため、何らかの増幅機構が必要である。

加えて、マグネターは近年最も注目されている天体現象の1つである Fast Radio Burst (FRB) の一部の種族の起源の可能性について言及されている。実際に、2020年4月には天の川銀河の中心領域で発見されたマグネターがFRBと同程度のエネルギーを放出する現象が捉えられた(図3)。FRBはほとんどが系外銀河起源であり、その放射機構についても未だ謎が多い。従って、中性子星の電波放射機構を明らかにすることで、FRBの放射機構の理解にも新たな知見を与えることができると期待されている。

【観測対象】

自転周期変化率が 10^{-13} s s^{-1} 以上の若い中性子星を最終的には30天体対象にし(電波パルサー $\times 10$ 、強磁場パルサー $\times 10$ 、マグネター $\times 10$ (1イベント/年で10年継続)、定常放射および突発放射のそれぞれについて観測的研究を進める。

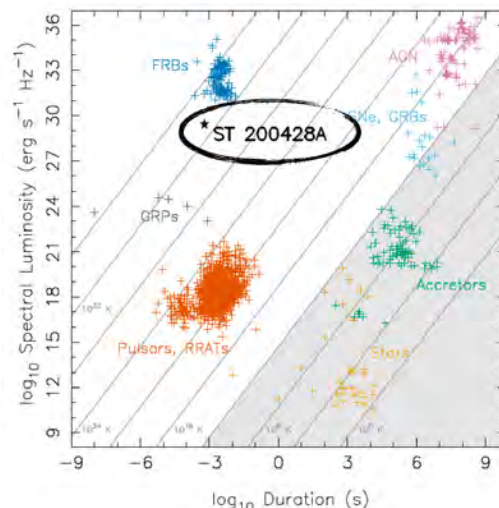


図3. 1.5MJy ms@1.4GHzでの検出報告がされたSGR1935+2154(ST 200428A)のradio phase-spaceにおける位置(Bochenek et al. 2020)。

【観測手法および目標】

定常パルスの10年間のモニタリング観測(20天体 $\times 10$ 回/年 $\times 5$ 時間/天体/回)とアウトバーストの追観測(10年 $\times 1$ 天体/年 $\times 10$ 回 $\times 5$ 時間/回)を行う。初期の準備研究期間(第4期中期計画前半)においては、比較的明るい数天体程度に絞ってモニターを開始する。最終的には年間1050時間の観測時間を投入する必要がある。

上記の中性子星モニタープロジェクトによって、5%の精度で運動を追跡し、10%の精度で年周視差から距離を決める。親超新星残骸を特定して推定年齢を与え、特性年齢と比較する。自転周期と自転周期変化率を長期モニターし減速指数を得る($\Omega, \dot{\Omega}$ をそれぞれ角速度とその変化率とすると、両者の間には $\dot{\Omega} = -k\Omega^n$ の関係がある。ここで k は比例定数、 n が減速指数である)。減速指数と超新星残骸の形態から、マグネターがマグネターとして誕生するのか否かについて議論する。また、広帯域放射スペクトルを獲得し、冪が折れ曲がるか連続的に変化するか、また周波数ごとの時間減衰を調べ、放射荷電粒子の位相空間分布と磁場構造について示唆を得る。

【装置要求】

短期的にはC/X/K帯高感度同時受信VLBI観測システム(~3000km基線)の開発による国内VLBIアレイの強化が必須。さらに東アジアVLBI観測網における多数の大型望遠鏡を活用した高精度位置天文観測の実施に向けて、長基線を担うVERAの同周波数帯の強化が望まれる。上記開発の実現に向けた研究と並行し、天体数・精度への大きな制約を許容しながら現EAVN C帯による準備研究は実施可能。

中長期的には P/L/S 帯高感度同時受信 VLBI 観測システムの追加搭載 (VERA および国内 VLBI 局) も必要。第 4 期中期計画前半から開発の検討を進める。

【期待される波及効果・独自性】

若い中性子星では、位置天文とパルス計測の結果を両方含めた世界初の本格的なカタログデータを出版できる。また、中性子星は近年アクシオン検証の重要な実験場になりうる可能性が示唆されているため、アクシオンの質量と結合定数について世界最高レベルの独立した制限を得られる可能性もある。しかしながら、現状ではアクシオンそのものが仮説の域を出ないため、ここでは副産物として得られる成果の可能性を言及するに留める。

さらには星の誕生と進化および重力波を放出するようなコンパクト天体同士の連星系の形成に関する理解など広く研究分野を横断した波及効果が期待できる。そして本研究によりコンパクト天体の起源と極限物理の研究に新展開をもたらす、次世代の大型望遠鏡時代においても独自の地位を築くことができる。

加えてアジアの望遠鏡網の機能も大きく強化され、将来の大型装置とも有機的に結びつくアレイが誕生する。

1.2 若い中性子星はどのような性質を持っているのか？

【研究背景・目的】

中性子星が予言されてから 100 年以上が経過し、パルサーが発見されてから半世紀が経過するが、特性年齢が 100 年以下の領域が全くの空白である (図 2 左参照)。言い換えれば生まれたばかりのパルサー(中性子星)を観測した例がない。ゆえに「マグネターはマグネターとして生まれるのか？」という単純な問いに答えを得ておらず、強い磁場が先天的なのかあるいは後天的なのかは観測的に証明がなされていない。

この問題のひとつの解決策は、若い中性子星を探し出すことである。前者の可能性が最も高いのは、1987 年に大マゼラン星雲で起こった超新星 SN1987A であろう。2019 年 11 月に、ALMA 望遠鏡が SN1987A の内部に、加熱源としての中性子星が存在する傍証を突き止めている (Cigan et al. 2019)。しかしより直接的な証拠となる光度周期変動天体(X 線や電波)の存在はまだ見つかっていない。

将来的に SN1987A のパルサー観測が達成されたとしても 1 例だけではサンプルが少ない。しかし、天の川銀河系内外で今後見つかるかもしれない中性子星にも目を向けるで、サンプル数を増やし、中性子星の誕生初期における進化過程の理解に迫ることができる可能性がある。近年の大規模な可視光帯における掃天観測体制の発展により、超新星爆発は天の川銀河から 10 Mpc 以内の銀河で数年に 1 回、20 Mpc 以内の銀河では年に 1 回程度発生していることが分かっている。ゆえに 100 年以内に起きた近傍の超新星の数は数 10 個から 100 個程度と予想されている。

系外の超新星爆発の多波長観測では、放射の光度曲線や輝線から、親星の質量を推定することが可能である。そこで超新星残骸の中の若い中性子星を探索し、中性子星の有無を明確にできれば、中性子星を作り出す親星の最大質量、あるいは中性子星とブラックホールとの境界となる親星の質

量にも知見が得られるだろう。現在は諸説あり、20 から 30 倍の太陽質量と言われている。中性子星とブラックホールを区別する有力な方法の一つが、電波パルスが見つかるかどうかではないかと考えられる。少なくともブラックホールについては電波強度が小さい(系内のマイクロウェーサーで定常放射は明るいもので ~ 10 mJy@5kpc、孤立系 BH は mJy を大きく下回るレベル)ことから、系外で検出されることはないと考えられる。また超新星残骸の電波残光は明るい、パルスはしないと考えられるため、区別は可能である。図4には系外の若い超新星残骸の VLBA による観測例を示す。なお、この中性子星の搜索観測を定期的に行えば、結果的に超新星残骸の膨張過程を詳細に撮像することもできる。他波長では到達できない分解能で残骸と星周ガスの相互作用の様子を調べることができる。

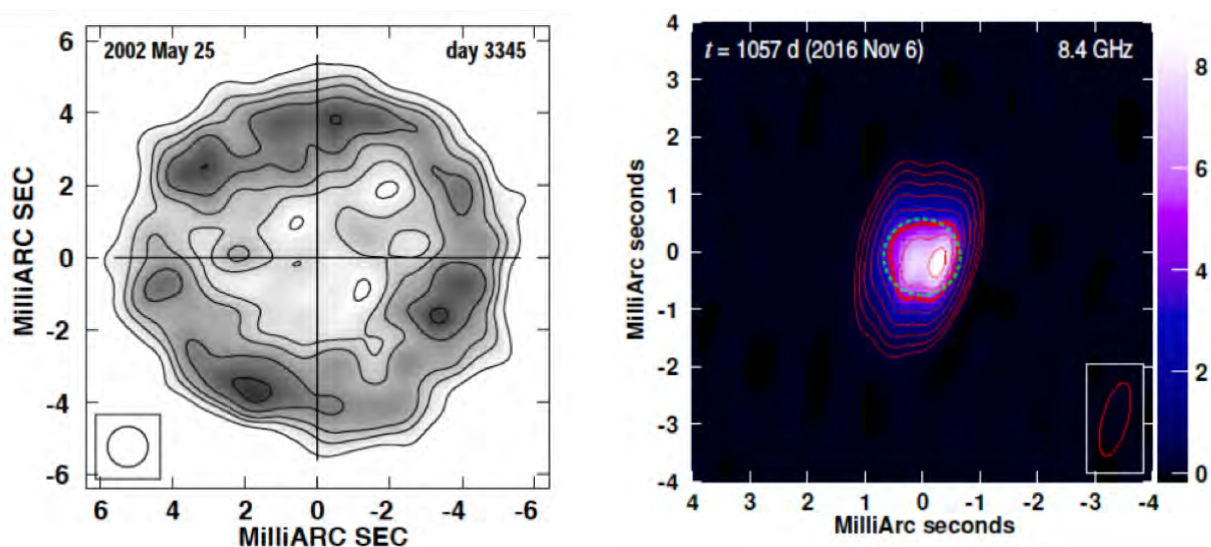


図4. 超新星残骸 SN1993J の CSM との相互作用の様子 (左、Bietenholz et al. 2003) と超新星残骸 SN2014C の CSM との相互作用の様子 (右、Bietenholz et al. 2018)

超新星残骸は厚いガスのため電磁波の吸収が起こる。そのため非常に若い超新星残骸では、たとえその中にパルサーがあっても、吸収を受けて観測することができない。ゆえに、数 10 年から数 100 年経過した超新星残骸が観測の候補となる。年齢に幅があるのは、残骸の見込み角や非一様性など、実際の吸収量は放出物の分布に強く依存するからである。超新星 SN1987A は放出物が濃く、腫れ上がるまでまだ数 10 年かかるのではという予測がある。おおぐま座の M81 に位置する SN1993J は 3.7 Mpc 離れるが、比較的軽量の星の爆発のためすでに晴れ上がり、パルスを検出できるかもしれない。晴れ上がってもなおパルスが検出されなければ、それはブラックホールである可能性が高いとも考えられる。

【観測対象】

近傍で発現から数 10 年程度の系外超新星残骸 3 天体と 10 年程度のもの 5 天体、および SN1993J。前者の 8 天体のうち半数が監視の候補になりうると想定して以下観測手法等を検討。

【観測手法および目標】

系外超新星の撮像観測：2周波数（C/K 帯）で発現から数十年程度の3 SNR の撮像観測を計60時間（3天体 x 10時間 x 2周波）実施しSN1993J以外の候補天体を探査する。また、発現から10年程度の5 SNR の撮像モニターを年間200時間（5天体 x 10時間 x 2周波 x 2回）の観測で3年程度継続し、CSM の光学的な環境や膨張速度等を調査する。近傍の系外SNR から中性子星の観測に適したcm波でCSMの晴れ上がった天体を探しだす。これらの観測はAGN放射との切り分けのため、撮像観測が必須である。

超新星残骸におけるパルス検出観測：C/X帯（最終的にはP/L/S/C/X帯）による高感度観測で月例監視を10年間実施する。年間あたり200時間の観測を行う（5天体 x 4時間 x 10回、VLBI/大型単一鏡/phase-up）。この観測により、数MJy ms アウトバーストレベルのパルス放射やカニパルサーの巨大電波パルスレベルの放射の有無や、その頻度に関し10年間の観測で制限をつける。

【装置要求】

短期的にはC/X/K帯高感度同時受信VLBI観測システム（~3000km基線）の開発による国内VLBIアレイの強化が必須。さらに東アジアVLBI観測網における多数の大型望遠鏡を活用した観測に向け、長基線を担うVERAの同周波数帯の強化が望まれる。上記開発の実現に向けた研究と並行し、天体数・精度への大きな制約を許容しながら現EAVN C帯による準備研究は実施可能。

中長期的にはP/L/S帯高感度同時受信VLBI観測システムの追加搭載（VERAおよび国内VLBI局）も必要。第4期中期計画前半から開発の検討を進める。

【期待される波及効果・独自性】

誕生後100年以内の中性子星からの電波パルスを観測した例は無いため、1例でも検出できれば大きなマイルストーンになる。また、非常に若い中性子星について突発性パルスの有無を含む電波放射の性質を探査する上で、発現後数十年程度の極近傍に存在する系外超新星残骸は最も直接的な知見を与えてくれる可能性がある。

2 系内ブラックホールの起源

2.1 星質量ブラックホールは超新星爆発とともに誕生するのか？

【研究背景・目的】

ブラックホール (BH) は超新星爆発によって形成したとされる。しかしその現場を確かめた例はまだない。また、銀河系内ブラックホールは中性子星と似ていて、高速度運動を示すものもあり、これはBH形成時の超新星爆発で特異運動を獲得した可能性が高い。一方、最も有名なブラックホール連星 Cyg X-1 は特異運動を示さないとされる。伴星は 25 太陽質量の大質量星で短寿命であり、このブラックホールは形成してからまだ短時間しか経過していない。それにもかかわらず、近傍に超新星残骸は見つからず、また連星系は特異運動を示さない。これは、Cyg X-1 が爆発せずに形成したブラックホールであることを示す可能性がある (図5 参照)。このような先行研究を参考に、銀河系内の連星ブラックホールの位置・運動の観測に基づいて、ブラックホールの形成過程、特に爆発しないブラックホール形成過程の検証を行う。本研究によって

- ・ BH の親 SNR は存在するのか？
- ・ 星質量 BH は特異運動を持っているのか？

を明らかにする。

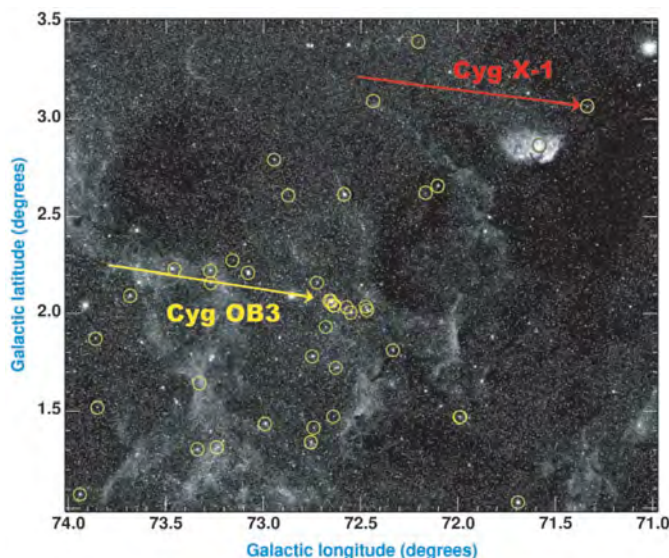


図 5. 白鳥座領域の OB3 と白鳥座 X-1 の位置関係 (Mirabel & Rodrigues 2003)。過去に白鳥座 X-1 に対する位置天文観測が実施されているが、中性子星 (パルサー) の典型的な固有運動の 20 分の 1 程度の $\sim 9\text{km/s}$ しか固有運動を示さないにもかかわらず、近傍には BH が生まれたと思われる超新星残骸が存在しないことが明らかになった。

【観測対象】

O/OB 型星を伴う系内の X 線連星 (XRBS) であれば、コンパクト星の親星である大質量星を伴星と同時期に誕生していると考えられる。したがって、超新星爆発によってブラックホールが誕生した場合、近傍に超新星残骸が残っている可能性が高い。Cyg X-3, Cyg X-1, LS 5039 ほか数天体 (ガンマ線連星を含む) などは非常に良い観測対象になりうる。また、将来的な感度の向上 (検出限界 (7σ) $< 1\text{mJy}$) により、さらに 10 天体程度が候補天体として追加される。

特に可視光帯の観測衛星 Gaia は銀河内のコンパクト天体の位置天文観測を網羅的に実施しているが、特に観測が困難になる銀河面を見通す方向においては電波帯での本研究に大きな利点がある。

【観測手法および目標】

装置要求に示す観測性能の元、位置天文観測による月例監視を実行し、星質量ブラックホールの

天球面移動速度を 10km/s の精度で決定する。そのためには、5 天体について 1 回あたり 8 時間の観測を年 10 回（年間あたり 2 ヶ月間の定期保守を想定）、5 年間継続する。本研究として計 400 時間/年を要求する。これにより固有運動を $\mu \sim 2\text{mas/yr}/(\text{d/kpc})$ の精度で決定でき、比較的遠方である 10kpc に位置する天体の場合でも十分に目的を達成することが可能である。

【装置要求】

短期的には C/X/K 帯高感度同時受信 VLBI 観測システム（ $\sim 3000\text{km}$ 基線）の開発による国内 VLBI アレイの強化が必須。さらに東アジア VLBI 観測網における多数の大型望遠鏡を活用した高精度位置天文観測の実施に向けて、長基線を担う VERA の同周波数帯の強化が望まれる。上記開発の実現に向けた研究と並行し、天体数・精度への大きな制約を許容しながら現 EAVN C 帯による準備研究は実施可能

【期待される波及効果・独自性】

親超新星残骸が同定けされた星質量ブラックホールは存在しない。また、特異運動が確認されないために超新星爆発を介さずブラックホールが誕生した可能性を示唆する研究も存在する。本研究はブラックホールの起源について核心に迫る知見を我々に与える可能性がある。

2.2 BH の放射機構：ジェットはどのように発生するのか？

【研究背景・目的】

系内の星質量ブラックホールと伴星との連星系を成すマイクロエーサー（例えば GRS1915+105）は X 線・電波で様々な強度変動モードを示すことが知られている（e.g., Pooley & Fender 1997）が、その多様性の起源は必ずしも明らかではない。また、円盤放射である X 線とジェット放射である電波は放射領域が異なるにもかかわらず、強度変動に何らかの相関があると同時に、図 6 に示すように X 線と電波の光度にも比例に近い関係があることが観測的に知られている（e.g., Islam & Zdziarski 2018）。

これまでのマイクロエーサーに対する VLBI 観測による研究は、短い場合でも

BH X-ray binaryのX線と電波強度の関係

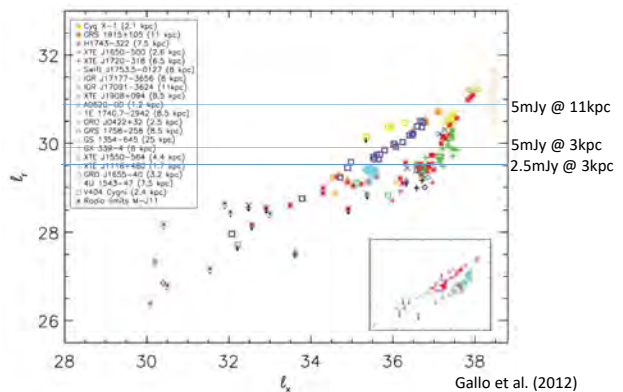


図 6. ブラックホール X 線連星における電波光度と X 線光度の関係。横軸：X 線光度、縦軸：電波光度。水色の横線は 3kpc および 11kpc における天体の電波帯フラックス密度を示している。数 mJy 程度の明るさであれば、山口干渉計もしくは大学 VLBI 連携によって有意に検出することが可能である。

1 日程度の時間スケールでジェット塊の噴出を描き出すのが中心だった（Miller-Jones et al. 2004, ApJ 600, 368）。しかし近年、電波強度変動は日スケールの長時間変動に 30 分程度の短時間変動が重畳していることが明らかになってきた（e.g., Tetarenko et al. 2017）。この短時間変動はジェット形成領域近傍の現象を探索する手がかりとなる。30 分の時間に対応する空間スケールは 3~4

天文単位であり、10 kpc の距離では 0.3~0.4 mas に相当する。この空間分解能かつ 30 分程度の時間分解能でイメージング観測を行うことが極めて重要であるものの (Miller-Jones et al. 2019)、未だにこのような研究の事例は限られている。

時間領域に注目し、X線と電波の強度変動と放射領域の構造の観測を行うことが、円盤とジェットの関係、結果的にジェット形成機構の解明につながる可能性がある。従って、短時間変動に注目しながらマイクロクエーサーの系統的な観測を行うことで、ジェット形成・加速の機構を解明する。

【観測対象】

GRS 1915+105, Cyg X-1, LS 5039 ほか数天体 (ガンマ線連星を含む) などは非常に良い観測対象になりうる。X線観測による発見から半世紀が経つにもかかわらず、コンパクト星の正体が明らかでない Cyg X-3 も重要な観測対象となる。また、将来的な感度の向上 (検出限界<1mJy) により、さらに 10 天体程度が候補天体として追加される。

【観測手法および目標】

コンパクト天体の時間変動研究はガンマ線、X線、可視/赤外などとの多波長連携観測が重要である。山口干渉計や JVN 少数基線 VLBI を用いて、2回/週 (数時間/回/天体) の継続的な高感度モニターを実施し、平穏時も含め他波長とも比較可能なデータを取得していく。そして他波長との強度変動モニターを行い円盤放射とジェット放射のタイミングの差異を調べる

アウトバーストもしくはその兆候を検出した際には、装置要求で示した装置により高時間分解能イメージング観測を2週間で7回実施する。1年あたり2天体のアウトバーストを想定し、2天体 x 8時間 x 7回の計110時間/年を要求する。この観測により、分から日スケールにおけるジェット放射における物理量の時間発展を調べる

【装置要求】

定常的なモニター：山口干渉計もしくは国内少数基線 VLBI (6-8GHz 帯) による検出感度数 mJy の高感度モニターを実施する。広帯域化により検出感度 1mJy を達成することで観測対象を3倍程度に広げることが可能になる。

フレア時のイメージングモニター：短時間変動をイメージングモニターするためには、コンパクトなアレイであり、かつ空間周波数が十分に埋まっている必要がある。従って、短期的には C/X/K 帯高感度同時受信 VLBI 観測システム (~ 3000km 基線) の開発による国内 VLBI アレイの強化が必須。特に長基線を担う VERA の同周波数帯の高感度化を含めた強化が望まれる。

【期待される波及効果・独自性】

マイクロクエーサーのジェット発生過程を画像化し、その時間発展を特に X線の時間変動と詳細に調査することでディスクジェット接続の理解が進展する可能性がある。それによって、質量降着とジェットの噴出・時間発展の関係解明が期待できる。

参考文献

1. Bochenek, C. D., et al., 2020, *Nature* 587, 59
2. Bietenholz, F. M., et al., 2003, *ApJ* 597, 374
3. Bietenholz, F. M., et al., 2018, *MNRAS* 475, 1756
4. Cigan, P., et al., 2019, *ApJ*, 886, 51
5. Enoto, T., et al., 2019, *Rep. Prog. Phys.* 82, 106901
6. Gallo, E., et al., 2012, *MNRAS* 423, 590
7. Islam, N. & Zdziarski, A. A., 2018, *MNRAS* 481, 4513
8. Miller-Jones, J. C., et al., 2004, *ApJ* 600, 368
9. Miller-Jones, J. C., et al., 2019, *nature*, 569, 374
10. Mirabel, I. F. & Rodrigues, I., 2003, *Science* 300, 1119
11. Pooley, G., G. & Fender, R. P., 1997, *MNRAS* 292, 925
12. Tetarenko, A. J., et al., 2017, *MNRAS* 469, 3141

補足資料：地球・測地WG

Appendix 1

自由コア章動とその検出精度の現状

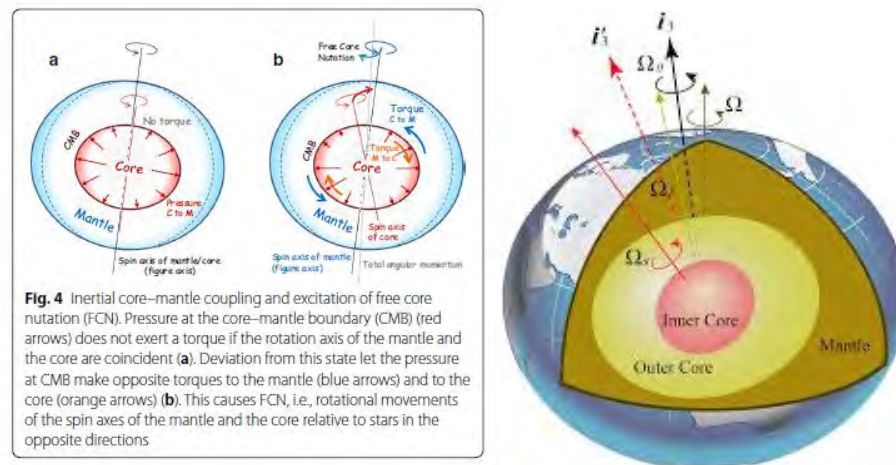


Fig. A1-1, 自由コア章動の発生要因モデル. 左図は流体核自由章動 (FCN) [Heki,2020, EPS], 右図は内核自由章動 (FICN) [Guo and Shen, 2020, JGR, 10.1029/2019JB018571]. 何れもマントルに対する自転軸の傾きや構造の違いによって潮汐から発生する境界への応力分布の差が回転を生み出すとされる.

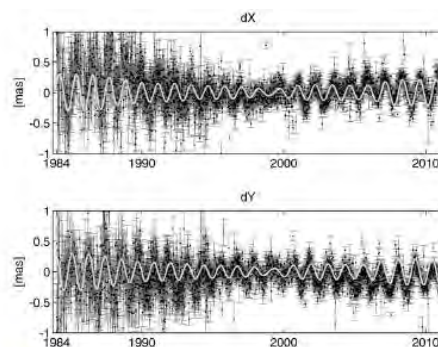


Fig. 2. CPO with respect to the IAU 2006/2000A precession-nutation model (grey) together with the FCN model (light grey) estimated in this work. Before 1986.0 and after 2009.0, the model is extrapolated.

Fig. A1-2, 1984年から計測されたFCNの様相[Krasna H., Böhm J., Schuh H. 2013, A&A]

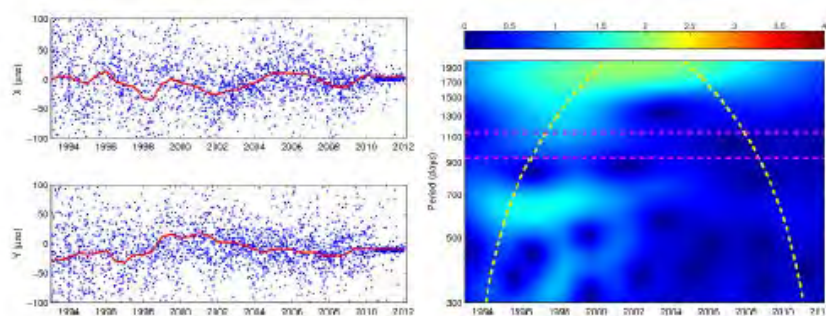


Figure 3. Nutational signature of the unstable radio sources (left), and prograde band of its wavelet spectrum (right). The horizontal dotted lines show the FICN frequency band following Mathews et al. (2002). Amplitude unit: μ s.

Fig. A1-3, FICN検出の試み. [Lambert, et al., 2012, 7th IVS GM Proceedings] FICNのレゾナンス周期が予測される赤破線帯に目立ったピークは見られない.

Appendix 2

要求性能

1. Geodetic VLBI (Domestic -> International, Global), 将来的には deep space VLBI with Lunar - Space Missionが望まれる.
2. 周波数, 帯域: 24GHz帯, 43 GHz帯, または, VGOSの受信帯域 (3-15 GHz), 可能であれば 3~60 GHz (~SKA2の範疇か?)等, 超広帯域スペクトルアナライザに対応できれば, VGOSとの共同観測と, ミリ波を使った章動角計測の共存が可能である.
3. 帯域幅は 8 or 16 GHzBW 以上の広帯域へ広げることを目標. マルチチャンネル化, 有効帯域幅を広げて, 遅延計測感度を向上とフリンジ検出の高感度化を両立させる.
4. 多視野, 複数beamを作成できるマルチビーム, 広視野フィールドによる大気構造推定の時間密度向上があると便利である. 観測密度の向上は測地計測とデータ較正にとって重要. VERAの700~800 scan/sessionを基準として, さらなるscanの時間密度向上が保証されること.
5. 広帯域に応じた高速サンプリング (~16 or 32 Gsps) . (Fig. A2-1)
6. 特定観測周波数で, 天球上可視方向に散らばって分布する100天体以上のキューサーから得られる遅延の理論的的白色雑音誤差が1 psより小さくなるほどの信号雑音比でフリンジが検出できる感度.
7. アンテナは測地観測や広視野位置天文が出来るスペックであること. 焦点とアンテナ不動点の位置関係がアンテナの向く方位と仰角に対して一定であること. 時空測量基準点であるアンテナ不動点が基準座標系に固定されて, 空間不定性が極めて小さいこと. 地殻の基準座標系内での動きをトレースできることが望ましい.
8. アンテナの重力変形や熱変形がモニタ出来る事.
9. 基準信号周波数, クロック信号の安定度はトータルジッタで100 fs/sより小さい事を達成.
10. 伝送系の周波數位相特性とその時間変化が群遅延で数100 fsを上回らない安定性を保証すること, 若しくは較正が可能であること. アンテナの動きに対して, 特性が変化しないことが希望.
11. 相関器の付加誤差を10 fs/ps noise errorまで下げる. 演算精度を倍精度浮動小数点実数にすること. 広帯域信号に対して, Auto-corrとCross-corrのダイナミックレンジに対応すること. 積分セグメントの大きさの違いによって発生するFFT-積分時の雑音誤差を100 fs以下に抑え, 系統誤差を発生させない事 (Fig. A2-2), 相関係数の演算有効桁を小数点8桁以下まで保証すること. (Fig. A2-3)
12. 帯域内総位相揺らぎ特性が0.001 rad/~10分 r.m.s. (概算値)
13. 付加較正装置: 超広帯域スペクトルアナライザを用いた中性・電離大気の視線方向の輻射・遅延計測 (氏原, 市川 科研費, 2021, 等) のための広帯域化 (数 GHz~60 GHz), 大気輻射プロファイリング装置.
14. 電波源の輻射構造図等が整備されていること, 若しくはその輻射構造図をカタログ化できる体制.

具体的な装置 (計画) との関わり

1. 既存の装置 (既存VLBIアレイ+ α) で実現可能か
 - 最終目標は既存装置では実現可能ではない. 観測周波数を上げるなど角度分解能の向上が, 空間角度測定精度や安定性向上につながるかどうかは検証することが期待される.
 - 既存のアレイでは, 現状の広帯域観測での性能調査として数10 μ asの精度の計測実現化と性能確認が目標になる.
2. 既存VLBIアレイのアップグレード

- 観測可能周波数帯数と帯域幅のアップグレード。観測周波数を上げるなど角度分解能の向上が、空間角度測定精度や安定性向上につながるかどうかは検証することが期待される。
 - 広帯域化（数 GHz～60 GHz）、High Rate Sampling and Recording、VGOS観測帯とミリ波帯、深宇宙通信帯の両立。
 - 大気プロファイリングなど、遅延の時間安定性や信頼性を保証するシステムの開発が必要。観測感度や較正精度、基準周波数の高性能化を含め、全体的にVLBIパッケージとしての性能を数段階レベルアップさせることが中期までの目標となるか。（ここまでの、具体的に目指すことが出来る範囲か？）
3. 計画されている大型装置もしくは完全に新しい装置が必要か
- 10 μ asまでを目指す場合でも、汎地球基線でトータルエラー3 psの遅延決定精度が必要であり、遅延決定精度の条件緩和には基線長の伸長は必須である。
 - 汎地球VLBIネットワークでミリ波の広帯域・高感度ネットワークの新造・構築が希望される。
 - コアの振動、SLR、人工衛星軌道、等、地球重心モニタとの連携も望まれる。

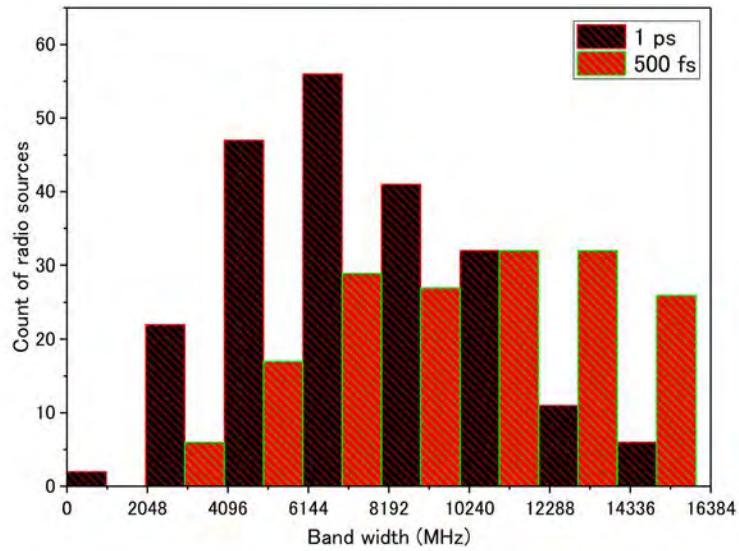


Fig. A2-1, 1ピコ秒の白色雑音誤差を実現する帯域幅. 8GHz幅あれば100以上の電波源を確保可能, 更に, 誤差0.5 psでも帯域幅が12 GHzまでであれば, 100以上は確保される. 構造効果指数 [Charlot et al.,2010, AJ] が1の電波源もほぼ網羅されている.

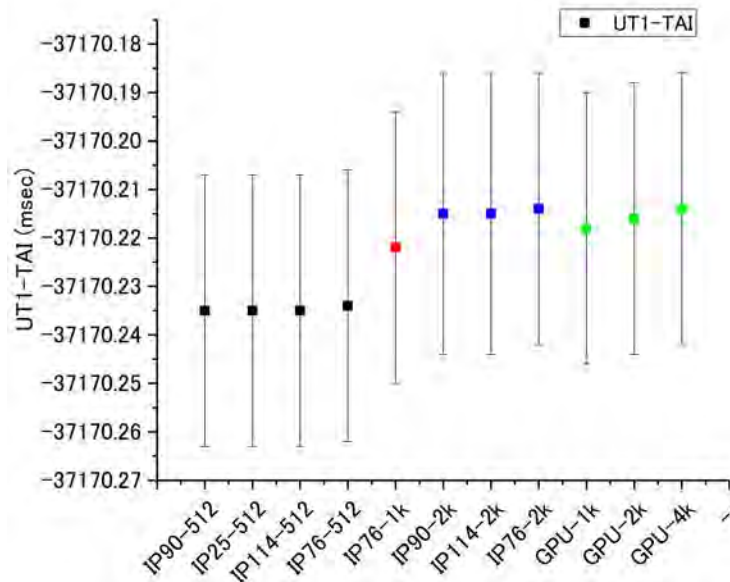


Fig. A2-2, 水沢SOFTWARE相関器の相関処理時のFFT点数の違いによって発生するUT1解の差. 黒 (512点), 赤 (1024点), 青 (2048点) でのUT1解. 緑はGPU相関器での相関処理で, 左から1024, 2048, 4096点でのUT1解に対応する.

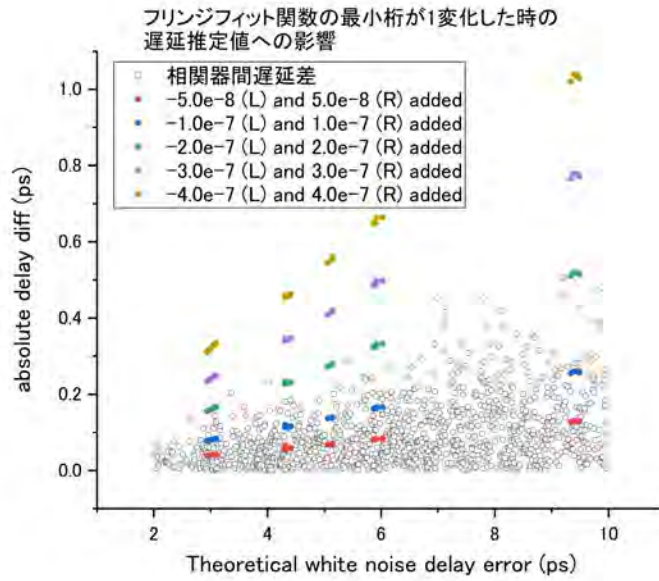


Fig. A2-3, 単精度実数演算の相関器から発生する遅延推定値の付加誤差. 現状では小数点7桁目で値が不安定になっている.

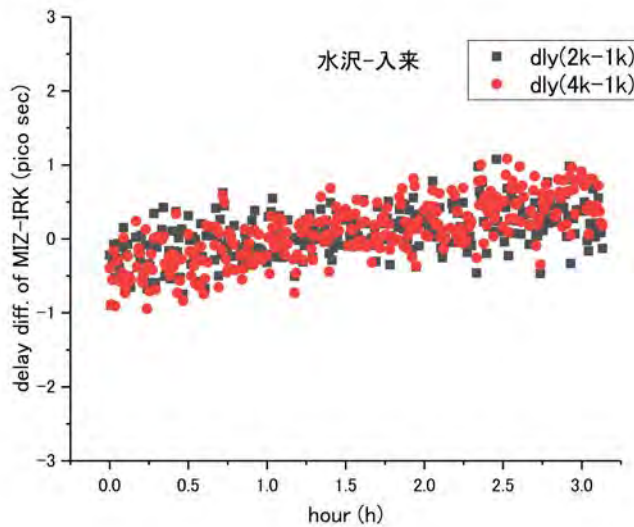


Fig. A2-4, 同じデータから異なるFFT点数で相関処理を行った時の遅延の差異に見られる雑音誤差と系統誤差. 1024点分光に対して, 2048点, 4096点の時の遅延の差異. 同一データの相関処理から得られた遅延観測値でありながら, 差に1ピコ秒の大きさの雑音成分と500 fs/3 hour程度の系統的な差が確認される. どのFFT分光点数の遅延が最も正しいかはこのデータからは確認できないが, FFT点数=積分セグメント長の違いにより相関処理結果に不定性が発生することが確認できる.

Appendix 3: Total Packagingとしての精度向上に向けて

遅延に加わる誤差の要素：理論的白色雑音以外では

電波源：位置や構造の時間不定性，周波数依存性，高周波，広帯域を原因とする誤差源

アンテナ：構造の外部環境擾乱による時間変化とその周波数特性変化

観測システム：帯域内周波数特性の時間揺らぎ

基準信号：基準信号や局内信号の周波数安定度

中性大気・電離大気：周波数揺らぎの中でランダムウォーク成分よりも周期の長い変動

観測局位置，EOP, PEP：位置のTRFに対する不定性，時間変化，ドップラー周波数の偏差

A/D変換：サンプリング周波数揺らぎ，エポックジッタ，サンプリング特性の時間変化

収差・光行差：周波数依存性，天文常数の正しさ

相関器の信頼性：演算性能，演算精度，時間-周波数変換の演算信頼性の問題

相関処理の信頼性：雑音成分と遅延追尾性能，部分ビット，部分位相補正

解析：VLBIの誤差分布特性に的確な重みづけとのずれ，周波数特性に合わせた解析方法は？

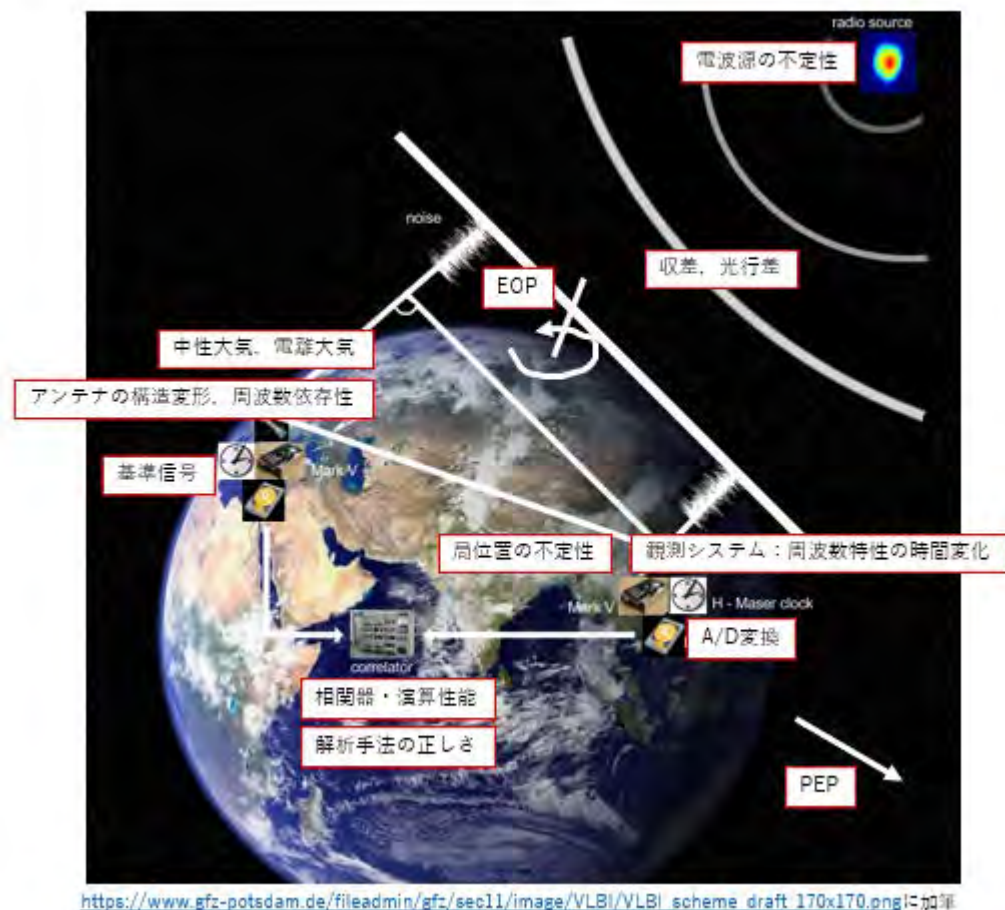


Fig A3-1 VLBI観測の誤差要因

誤差の削減や観測目標展開のstrategy

周波数揺らぎの時間特性に視点を置いて……

- 白色雑音成分は時間・周波数積分で対処。ランダムウォーク、不定バイアス成分は抽出と補正で対処するしかない。
- ピコ秒の精度に対応する補正方法（時間レゾリューション、周波数レゾリューション）。
- 帯域内位相特性の時間変化は、観測帯域内8GHz内で0.01 rad rmsが要求ライン
- 周波数変化のトレーサビリティは、数分～観測時間。Scan間の周波数特性変化を結合すること。
- 相関処理が研究の科学的要求に見合う性能であるかどうかを確認し、演算の能力や性能の向上を図る。

1、トータルエラーバジェットとして、試験基線で10 ps、そして1 psに向かい、最終的にfsオーダーに相当する角度計測感度を目指す。

2、観測装置としては、地球上の基線で精度向上を図る。

3、太陽系探査機、月面干渉計、外惑星・衛星の章動計測へ展開。

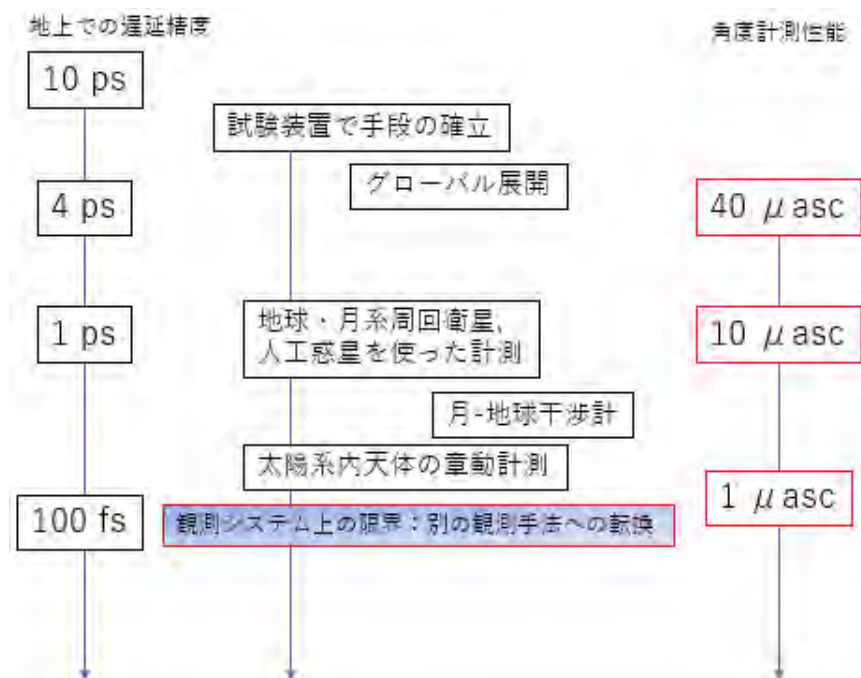


Fig A3-2 遅延の精度と角度計測性能の関連性。その精度を達成するための方針。

VLBIよりも信頼性の高い観測手法——次世代の時空計測研究者に期待
 相対論測地、次世代の時空計測（時間基準の赤外、光への移行、光格子時計、空間の再定義、時間・周波数のRefが変わるか？）の可能性を探ることが重要かと考えられる。
 次世代周波数基準を用いた新たな時空計測の展望と移行を期待。

Appendix 4

ポストフィット残差の分布の大きさ（無バイアス標準偏差）を縮小させてきたVERA測地観測の軌跡。VLBIパラメータ推定値に影響する誤差要因としては、白色雑音誤差がVERA開始当時のX帯観測の時はドミナントであった。K帯への観測周波数の変更，更に広帯域試験観測によって，フリッジ検出感度向上と共に白色雑音誤差が減少し，ポストフィット遅延残差が縮小していったことを表している。

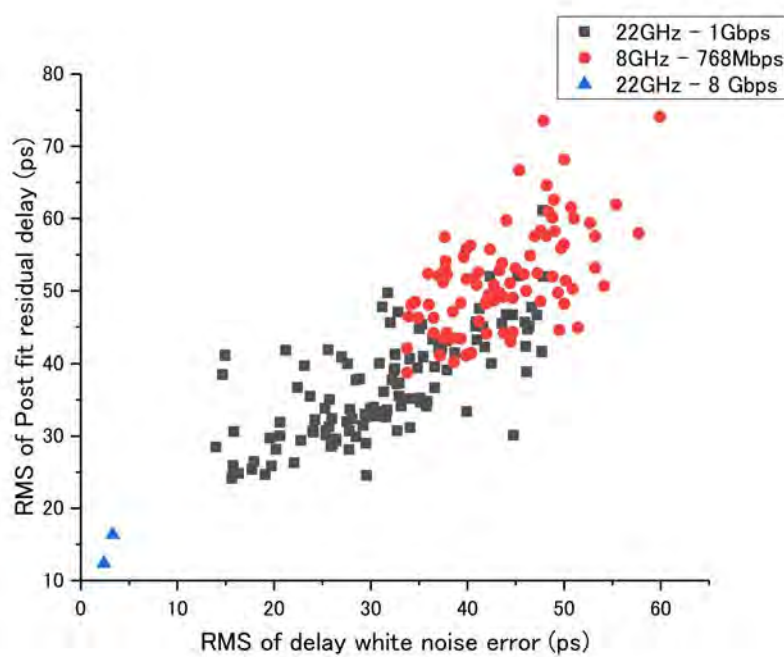


Fig. A4-1, 白色雑音誤差とポストフィット遅延残差のr.m.s.との関係.

Appendix 5

章動角推定精度（時空系角度計測精度）と遅延推定値誤差の関係。章動角推定感度は基線長に比例する。基線長が長くなれば、遅延推定精度を究極まで上げなくても、章動角の推定精度を上げることが期待できる。

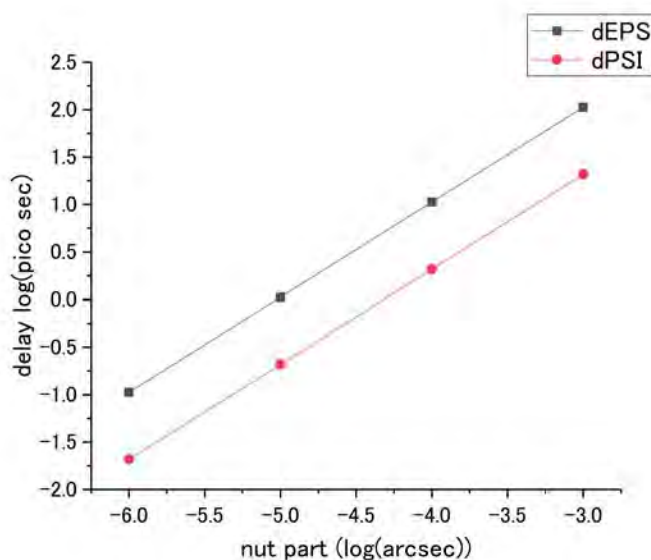


Fig.A5-1, VERAネットワークの基線長で章動角を推定するために必要な遅延推定精度と章動角推定感度の関係

Table A5-1, $1 \mu\text{as}$ の章動角精度を得るために必要な遅延推定精度と基線長の関係。パラメータ推定感度。国際基線で1 psの遅延精度を達成できれば、 $5 \mu\text{as}$ より良い精度で章動の計測が可能になると予想される。

基線	基線長 km	感度 ps/ μasc
VERA	2000	0.06
Global	10000	0.3
人工衛星	40000	1.2
地球-月	300000	10

Appendix 6

マイクロ秒角の角度計測と波及する観測対象
(この中でEurekaを探求)

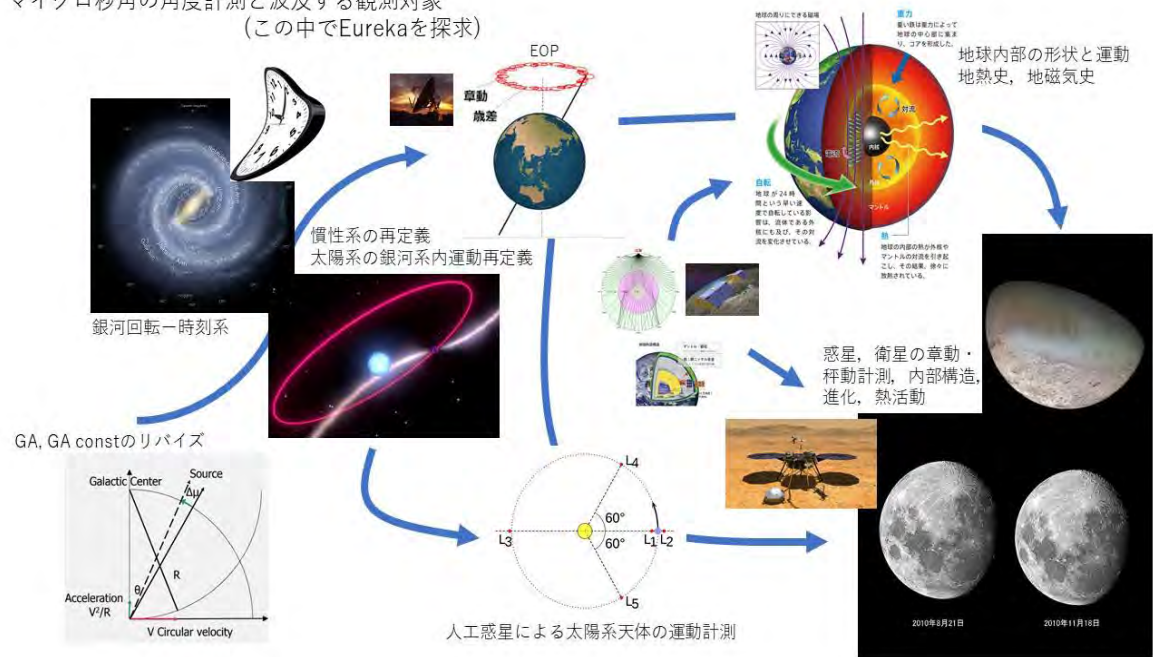


Fig. A6-1, 章動角推定精度向上など角度推定精度の向上に関わる観測研究テーマ

補足資料：星WG

星 WG 将来計画 - VLBI で解明する星の誕生と終焉の様子 -

Authors

中川 亜紀治^{1,2}, 廣田 朋也^{3,4}, 今井 裕^{1,2,5}, 須藤 広志⁶, 倉山 智春⁷, 米倉 覚則⁸, 元木 業人⁹, and 杉山 孝一郎^{10,3}

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

² Amanogawa Galaxy Astronomy Research Center, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto, Kagoshima 890-0065

³ Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

⁴ Department of Astronomical Sciences, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Osawa 2-21-1, Mitaka-shi, Tokyo 181-8588, Japan

⁵ Center for General Education, Institute for Comprehensive Education, Kagoshima University, 1-21-30 Korimoto, Kagoshima 890-0065

⁶ Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu, Gifu 501-1193

⁷ Teikyo University of Science, 2-2-1 Senju-Sakuragi, Adachi-ku, Tokyo 120-0045

⁸ Center for Astronomy, Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito, Ibaraki 310-8512, Japan

⁹ Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, Yoshida 1677-1, Yamaguchi, Yamaguchi 753-8512

¹⁰ National Astronomical Research Institute of Thailand, 260 M.4, T. Donkaew, Amphur Maerim, Chiang Mai, 50180, Thailand

星形成

研究の意義

大質量星は、膨大なエネルギー還元および元素合成の観点から、宇宙における物理/化学進化のもっとも基本的な要素であると認識されている。また低質量星を含む星のほとんどが大質量星と共に星団として生まれることから、大質量星の形成/進化過程を明らかにすることは星形成を定量的に理解する上で不可欠である。

従来の研究状況・問題点

大質量原始星は存在が稀であり、統計的に十分な天体数を得るためには5 kpcという遠方まで対象を広げる必要がある(59)。また、星団内の個別星を分解する必要性から、VLBIを含む高分解能観測がこれらの研究には本質的である。近年、ALMAを用いた100 au程度の分解能による大質量原始星・連星系のアウトフローや円盤に関する先駆的な研究が国内VLBIグループでも始められている(39; 72; 97)。同程度のスケールを捉えた熱的放射との直接比較が可能となったことで、レーザーを用いたVLBI観測は一歩進んだアプローチが求められている。

何を明らかにするのか？

大質量星形成を理解する上で、(1)円盤分裂・連星形成などによる初期質量関数(IMF)の決定機構の解明、(2)大質量原始星への質量降着機構の解明を通じた原始星進化的理論の確立の2点が未解明の重要課題である。これらは、円盤内の降着する質量分配の観点から互いに密接に関わり合っている。大質量原始星の進化は降着の量と質に大きく依存することが理論的に示されており(e.g., 47; 48; 37; 62)、高分解能観測により星進化の時系列に沿って降着流や円盤、原始星・連星系の物理状態を統計的に明らかにすることで、上記課題の解明に貢献する。

達成するための手段

こうした科学的背景から幅広い進化段階を網羅する以下の3つの将来計画を提案する。

1. **レーザーの周期変動を通じた質量降着率の導出**：6.7 GHz帯メタノールレーザーの周期的強度変動は、2003年の初検出(32)を皮切りに、これまで約60天体で1ヶ月～数年に渡る幅広い周期で確認されている。JVN日立32 m鏡による2012年からの長期間・高頻度モニターでは、このうち30天体で新検出を報告している(105; 91)。周期性の起源として提唱される複数の理論のうち、大質量原始星の脈動不安定モデル(53)では、同時に予言される周期-光度関係を介し、現状のALMAですら解像できない微小な原始星表面の物理量(質量降着率含む)の定量的計測を可能とする。この周期-光度関係の観測的検証を目的として、EAVNによる周期変動天体の年周視差(距離)計測を通じた天体光度の高精度な導出、強度変動の極大・極小時におけるEAVNモニター観測による脈動天体に付随するレーザー成分の精密同定を目指す。
2. **レーザーフレアを通じた質量降着機構の解明**：近年、6.7 GHz帯メタノールレーザーでの1桁以上の増光(フレア)が、赤外線から電波連続波の増光を伴う大質量原始星での突発的質量降着(降着バースト)に先立って検出されている(30; 16; 15)。しかし降着バーストの証拠が確定した大質量原始星は数例に留まっており、大質量星における質量降着機構の理解には様々なレーザーフレアの多天体での観測が鍵となる。この目的のため、フレア検出やそのタイムスケール・再帰性を調べる単一鏡モニター、レーザーの強度・構造・速度・分布変化をモニターするフレア直後のVLBI即時(ToO)観測、降着バーストに伴う原始星光度や物理・化学状態変化、質量放出機構の解明を目指した電波から赤外線での多波長観測を行う。
3. **希少な進化段階にある天体の大規模探索**：山口・茨城の大型望遠鏡を活用し、次世代干渉計観測に向けた希少な進化段階にある天体のデータベース作成を行う。特に進化の時系列上で重要な最初期と形成末期に着目し、赤外線暗黒星雲(IRDC)に埋もれた大質量原始星の種、水素燃焼開始直後の大質量原始星に付随する極小HII(ECHII)領域の大規模探索を行う。前者では「未だ中小質量だがいずれ大質量になる」種原始星からの電波ジェットを探索し、大質量星(連星)形成の初期環境(母体コア質量/円盤サイズや安定性/降着率/分裂可能性など)を探る上で重要な天体の同定を目指す。後者はECHII領域の初検出により、質量や降着率の多様性の観測的検証、および、降着率に依存した原始星進化的理論の検証を目指す。

期待される学問的インパクト・周辺分野への波及効果

分裂による原始連星形成の理解は、ブラックホール/中性子星連星系の形成・合体現象を探る上で重要である。また大質量星形成理論の確立は、観測の手が及ばない初期宇宙での巨大星形成を理解する上でも本質的である。

なにをどこまでやるのか？

1. **周期変動研究**：現時点で脈動起因と予想される約 30 天体に対する VLBI モニター観測を完了する。
2. **メーザーフレア研究**：年間 3-5 天体で期待されるフレア活動時に対応し、ToO 観測を実行する。
3. **電波ジェットおよび ECHII 源探査**：1000 天体程度の星無し IRDC コアに対して大学干涉計での電波ジェット探査とモニターを行う。また、JVN の少数基線観測で検出された ECHII 領域候補 38/255 天体に対して VLA/ALMA によるフォローアップ観測を進める。

新規性

2017 年、世界 13 か国約 30 人（現在約 70 人）の研究者によって Maser Monitoring Organization (M2O) が結成された。M2O で組織的体制が構築されたことにより、数 10 年間の研究においても統一的理解に至っていない多様なメーザー変動現象、これらを通じた質量降着現象の解明に向けた機運が高まっており、高い新規性を有している。また、特異な進化段階に着目した天体探査は過去に無く、独自天体リストの構築が新規的といえる。

日本の（VLBI 研究の）独自性・優位性

日本はメーザー時間変動の観測実績が豊富であり (88; 40; 41; 28)、M2O でもフレア検出や VLBI ToO 観測で中心的役割を果たしている (30; 93; 15)。M2O には日本の赤外線観測研究者も在籍し、多波長観測の経験も有している (100)。また、国内では大質量原始星周辺の円盤やアウトフロー、磁場構造の理論研究も盛んであり、高空間分解能観測と理論を融合させた共同研究も展開されている (53; 39; 72)。さらに、mJy レベルの連続波検出が可能な 1 基線干涉計 2 台は世界的にも稀な存在であり、高分解能観測研究において強い個性を有している。

必要な性能について

VLBI としては (1)EAVN の観測時間増加 (10 天体 ×12 回のモニター、40 天体 ×3 回のサーベイなどは約 500 時間)、(2) フレア発生 1 日以内の ToO 運用体制、(3)EAVN での年周視差計測、(4) 高感度位相補償のための広帯域化が不可欠である。可能であれば (5) 輝度温度 10^4 K を検出可能な基線長の施設 (8 GHz で 100 km、22 GHz で 30 km) も検討したい。茨城/山口干涉計では (6)1 mJy を検出可能な高感度化 (両偏波用バックエンド/解析手法整備/広帯域化) が必要となる。(1)(2) は既存装置での運用体制確立が急務であり、(3) は近い将来実現される計画である。(4)(6) は外部資金獲得などでアップグレードができれば実現可能である。(5) に関しては、現在 VLBI に参加していない国内外アンテナの転用、または新規アンテナの建設が必要である。

推進計画

短期：～2022 年 3 月

第 4 期中期計画へ向けた準備研究として、(1) 既存の国内装置による周期変動・フレア増光・電波ジェット/ECHII のサーベイ継続とこれらに基づく天体カタログ作成、(2) 干涉計・EAVN 高感度化へ向けた広帯域化・短基線新設・タイ 40 m 鏡など東南アジア局整備の検討、(3) ToO 観測に即応可能な運用体制確立を推進する。

中期：第 4 期中期計画（～2027 年度）

(1) 周期変動 20-30 天体に対する年周視差計測、および周期変動の極大・極小期を含む VLBI モニター観測、(2) 単一鏡モニターや M2O によるメーザーフレアの検出に即応した VLBI ToO 観測、(3) IRDC コア約 1000 天体に対する電波ジェット探査 (～2023 年)、および J-VLA によるフォローアップ観測を進める。(2) に関連して、約 13 年周期が予測されているオリオン KL の水メーザー (40; 41) では、2024 年の再フレアが期待される。

長期：2028 年度以降

将来的には、本第 4 期中期計画における観測研究を元に、特に熱的放射への感度面でより深化した SKA、ng-VLA、extended-ALMA を用いた研究へと発展させていきたい。例えば、これら次世代望遠鏡によって、脈動する大質量原始星膨張期の直接撮像、広視野 SKA によるフレア天体の広域探査と付随する熱的放射の時間変動観測、10 kpc 圏内における進化初期段階の電波ジェットや ECHII の無バイアス探査などが考えられる。

～予想される大質量星形成の流れ～

進化段階	分子雲形成	高密度ガス (コア/クランプ)形成	星無しコア /クランプ	Collapse開始期	降着期前半	膨張期	降着期後半	降着末期
赤外線観測	赤外線暗黒期 (FIR dark: no point source)							
原始星				誕生	MIR dark ?	NIR dark ?	NIR dark → bright	NIR bright
タイムスケール (yr)	> 10 ⁷	10 ⁶ - 10 ⁷	< 10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵ ?	< 10 Msun ~ 10 ⁴ ?	~ 10 Msun ~ 10 ⁴ ?	up to 20-30 Msun ? < 10 ⁵	ZAMS 10 ⁵ - 10 ⁶
キー物理など		動的圧縮	乱流/磁場	ビリアル平衡 → Monolithic Collapse 非平衡 → Global Collapse 円盤形成	重力不安定 円盤の分裂 Binary /multiple formation	原始星脈動?	質量上限の決定 H燃焼開始	HCHII - UCHII 円盤散逸



図 0.1: 本提案における星形成研究の各手段 1-3 で対象とする観測天体とその進化段階との関係。

終焉期の星

研究の意義

誕生時の質量が $M_* = 1 - 8 M_\odot$ の星は、誕生する星々の大部分を占め、かつ、宇宙空間における物質輸廻（星 → 星間空間）の大半を担う。このような星々は、その進化の末期に漸近巨星分枝 (AGB) 段階へと至り、様々な元素を内部で合成し、それらを最外層まで汲み上げて、大量の質量を伴って宇宙空間へと放出する。特に、質量が $M_* = 3 - 4 M_\odot$ の AGB 星は、割合が比較的多い上に質量放出率が極めて大きい ($dM/dt = 10^{-7} - 10^{-4} M_\odot \text{yr}^{-1}$)。さらに、私たち生命を形作る元素（炭素・窒素・酸素など）の主要な供給源として位置付けられる。実に銀河空間を漂うダストの 90% が、このような AGB 星起源であると考えられている (89)。

AGB 星から放出される物質の加速と拡散の物理的仕組みは、長年の未解明課題となっている。AGB 星はやがて惑星状星雲 (PN) を形成するが、それらが示す多彩な形態の起源もまた未解明である。また、銀河系内での AGB 星の 3 次元分布や運動を知ることは、銀河系内におけるダスト分布との相関の把握につながり、更に AGB 星の年齢と関連付けることで時間的・空間的な星形成やダスト形成の遍歴の理解にもつながる。

星周にまき散らされたダストやガスに埋もれた老齢星は、可視光や赤外線による高分解能観測が困難である。そこで、星周で励起されるメーザー放射を対象とした VLB 観測が重要な鍵を握る。星周メーザーについては、SiO, H₂O, OH など多数輝線の励起が知られており、これらの観測の組み合わせにより星周物質の物理状態や運動に関して豊富な情報をもたらされると期待される。逆に、メーザースポット群の見かけの振り舞いを正確に把握することが、メーザー源測定の精密化に欠かせない。これらの研究を踏まえた上での AGB 星を対象とする VLBI 測量は、可視光による Gaia 衛星に対して銀河系円盤・中心領域の測量において独自性を発揮し、銀河系全体の構造の中で現在質量放出している星々の分布を把握するという意味でも相補的役割も果たす。

従来の研究状況・問題点

星周メーザーは、老齢星の脈動変光や非等方的質量放出の影響を受けて目まぐるしく変化する。しかし従来の VLBI では、単一又は少数のメーザー輝線に対する個別で散発的な監視観測に留まり、メーザー励起機構の解明に至っていない。また同時に、星周縁中、特に星表面付近における真のガス運動を捉えているとは言い難い。故に、AGB 段階から PN 形成までの星周縁の進化が依然捉えられていない。また、星の年周視差や固有運動、星周縁内部運動が高精度で計測できた観測例は、比較的安定した H₂O メーザーを対象としたものに限定され (20 天体程度)、SiO メーザーについては極めて限定的である。従って、ガスや塵に埋もれた銀河系円盤や、約 8kpc 彼方の銀河中心領域など、天の川銀河の広い範囲で SiO メーザーを伴う AGB 星の分布や運動なども精度良く把握されていない。

何を明らかにするのか？

AGB 期以降の終焉期の恒星進化に関し、若い方から順に Mira 型期 (準規則変光星も含む)、OH/IR 星期、非変光 OH/IR 星期、後 AGB 期、前 PN 期に細かく分類して捉える。また、星質量/光度の差異にも注目する。その上で下記の具体的解明項目を設定する。

- メーザー放射分布と時間変化に関する各進化段階における特徴及びその時間推移
- 様々な変光星脈動の周期や位相に対する、メーザー放射分布の依存性
- 熱的放射及びメーザーデータを組み合わせによる可能となる、メーザー放射冷却機構の解明、及び、星周縁の形態/物理状態/運動の特徴とその時間推移
- 星本体の物理量とメーザー放射分布や星周縁物理状態及び質量放出率の間の相関関係
- 広い周期範囲 (300-2000 日) と複数系列における脈動変光の周期-光度関係のメーザー放射をプローブとした統一的描像
- 寿命 $10^7 - 10^9$ yr を持つ上記星々における銀河系内分布と出生地点の推定に基づいた、終焉星による星周物質拡散の定量的描像

目標を達成するための手段

高精度の測量と撮像を同時に、多数星周メーザーに対して実施することが必要である。その手段を確立するべく、主に VERA/JVN 及び EAVN 活用して実施する。広がった星周メーザーの構造と運動を捉えるべく、従来と同程度の角分解能でより高感度でメーザー源を追跡する。計測頻度は典型的に 1 か月間隔だが、特に SiO メーザー源の励起機構を解明することを主眼に置く目標星に対しては、メーザーの変化を動画で捉えるべく 2-3

週間間隔とする。多数輝線の同時観測は、メーザー源励起機構解明においてもメーザー源測量においても格段に精度を向上させる。従って、86 GHz の SiO や 1.6 GHz の OH メーザーの観測も視野に入れる。

- H₂O/SiO ($J = 1 \rightarrow 0, 2 \rightarrow 1$) メーザー源の測量と撮像を兼ねた VLBI モニター観測
- H₂O/SiO/OH メーザー源の単一鏡による強度・視線速度モニター
- 赤外線測光との連携による変光星の周期、絶対等級の決定、振動モード分類
- OH メーザー源の高感度 VLBI 撮像による星周縁 OH シェル視直径の計測

期待される学問的インパクト・周辺分野への波及効果

(1) 星の進化と星周物質の理解

- 星間空間における放射と物質との相互作用の物理素過程を直接把握することにつながる。老齡星は孤立・解放系にあり、メーザー放射の挙動を介して、星周囲の物質が中心星の物理的变化に支配されて時々刻々と変遷・移動する様子を把握することができるようになる。
- 長周期変光星における新しい周期-光度関係の把握が進み、星質量と変光周期・モードとの関係性について統一的モデルの提供へとつながる。
- 質量放出率のピーク直後にあって、人間の寿命程度の時間尺度で大きな変化が見られる後 AGB 期-前 PN 期における星の進化の仕組みを把握できる。

(2) AGB 星をプローブとして解明される天の川銀河スケールにおける物質循環の様相の把握

- 星による物質還元の量的/化学的な寄与の時間遍歴を銀河系構造部ごとに把握できる。
- 銀河系バルジと中心 BH の共進化に関わる中心核円盤・バルジの形成履歴の解明が進む。

なにをどこまでやるのか？

- 太陽系近傍で局所腕内外にある約 20 星に対して 5 年間で年周視差/固有運動を計測する。1 天体の測量に要する期間はおおよそ 1.5yr である。代表的な数天体では、SiO メーザー ($v = 1, 2, 3, J = 1 \rightarrow 0, v = 1, J = 2 \rightarrow 1, J = 3 \rightarrow 2$) の変光周期 2-3 サイクルにわたる位置比較を実施。観測総時間は 6 hr \times 18 回 \times 1.5(高頻度モニターによる増分) \times 20 星 = 3,240 hr。
- 天の川銀河中心核ディスク/円盤中の約 30 星の固有運動を計測する。各星に対して 3 カ月間隔で 2 年間程度運動を追跡する。観測総時間は 5 hr \times 8 回 \times 30 星 = 1,200 hr。

新規性

- SiO メーザー ($v = 1, 2, 3, J = 1 \rightarrow 0, v = 1, J = 2 \rightarrow 1$) の変光周期全般にわたる位置比較、及びこれによるメーザー励起効率の時間変化に基づいた励起機構モデルの決定。
- 既存の VLBI 装置では未開である 43 GHz 帯及び 86 GHz 帯での系統的な VLBI 位置天文観測。この周波数帯では高速天体スイッチングによる位相補償が難しい。Sgr A* 測量との協働も含めて、星形成領域測量に引き続いて VERA で本格始動する好機である。
- 数年にわたる系統的なメーザー源モニター観測に基づいて選別されるダスト過多で質量放出率が卓越した長周期 OH/IR 星に対する測量。1.6 GHz OH メーザー源も新たに測量対象に加える。

日本の (VLBI 研究の) 独自性・優位性

私たち VLBI コミュニティの経験

現在我々は、VERA/JVN に加え KVN/EAVN を含めた VLBI 観測を推進している。これら VLBI アレイは、星周メーザー源が著しく空間分解されずに観測できる基線長約 2000km 以内に 22GHz/43GHz 帯で観測できる望遠鏡が 9 台存在する。これは、VLBA/EVN/LBA にはない特長である。さらに、VLBI 専用の望遠鏡 7 台を使って高頻度のメーザー源モニター観測や年周視差計測が実現している。我々は、特に Mira 型星、OH/IR 星、SR 型星、赤色超巨星などの終焉星に対して、三角測量距離を測定しつつ星周物質の分布や 3 次元運動を解明してきた。また現在、著しい星周減光によって変光周期-光度関係が不明瞭である長周期 OH/IR 星の測量を進めている。これらの星々の中に明るい SiO メーザーを有しているものがあることを発見し、43 GHz の位置天文観測で極めて有利な性能を発揮する VERA の 2 ビーム位相補償観測により、世界に先駆けてこれら星々の質量放出を定量的に把握しつつある。加えて、VLBI により星周構造の au スケールで見られる構造を変光周期の 1/20 に対応する時間分解能で 1 変光サイクル以上にわたって捉える試みも、他波長帯観測には無い特徴である。

国内のア天文関連コミュニティ（他波長・理論など）の経験

国内では老齢星を対象とする赤外線観測が盛んであり、近赤外線に加え中間から遠赤外の波長帯でも観測装置の開発が進む。鹿児島大学 1m 鏡観測グループに留まらず東京大学の TAO グループとも既に協力関係にあり、研究対象星のリストを提供している。ダストが多く非常に長い周期を持つ OH/IR 星について、中間赤外での変光振幅を初めて決めることなどに貢献している。ダスト過多な老齢星では可視光から遠赤外線までの spectral energy distribution (SED) は重要で、他波長/他機関との連携で SED の時間変化把握なども視野に入れ、VLBI で測定されるそれら星々の距離や空間運動の情報とを組み合わせ、星周物質の大量放出と拡散の仕組みの解明を目指す。

これに加えて、次世代赤外線位置天文衛星計画 (JASMINE) に対して、VLBI 位置計測が先駆的な役割を果たす。測量精度を両者間で相互検証する為のサンプルを提供し、Sgr A* から異なる距離にある星々の運動に関するデータを持ち寄り、天の川銀河中心核円盤・バルジの形成に関わる星々の特定を進めることに貢献する。これにより、前述した 銀河系バルジと中心 BH の共進化の解明に資することになる。

必要な性能について

統計的分析が可能となる天体数 (>20 星) に対して 2 年間ずつ 1 カ月間隔で VLBI 観測を実施できる効率が求められる。さらに一部の天体で動画撮像の為に、2 - 3 週間間隔のモニター観測を要する。これらを実現可能な観測所要時間内で完結させるには、VERA には 22 GHz/43 GHz 帯同時観測できる準光学系を常設し、VERA2 ビーム位相補償システムの継続使用が求められる。SiO メーザーしか見られない銀河系中心付近にある多数の変光星に対して高精度位置計測を実現する相対 VLBI 観測を実現するには、このシステムを維持するか、高速天体切り替えが可能な望遠鏡が VERA に加えてさらに 4 台必要となる。また、メーザー天体に対しては両偏波観測によって、位置参照源に対しては広帯域化により観測の精度と効率の向上を図る。

さらに、KVN と野辺山 45m 鏡も組み込んで 86GHz 帯 SiO メーザーによる更に高分解能な VLBI 位置天文、また FAST/SKA1 などとの連携による 1.6 GHz 帯 OH メーザー源によるより多数の VLBI 位置天文を視野に入れ、これら周波数帯の受信機の整備等が必要となる。

主要 3 項目の成功達成基準と要求性能の関係

- 第 3 期中期計画期間では、VERA の 2 ビーム機構を活かし約 10 天体の長周期 OH/IR 星の年周視差を決定する（これは第 4 期での中間赤外線帯での周期光度関係を新たな確立へつながる）。
- 第 3 期中期計画期間では 2 天体、第 4 期では数天体の代表的 AGB 星に対する星周 H₂O / SiO (43 / 86 GHz) メーザーマップ重ね合わせや動画作成を実現する。
- 第 4 期以降で年周視差計測および周期光度関係を用いた測距に基づく天の川銀河円盤、中心核円盤/バルジに付随する OH/IR 星の分布と 3 次元運動情報を得る。

推進計画 (小項目の達成に向けて必要な観測的研究・理論的研究)

短期 (現在 ~ 2022 年 3 月)

現在は VERA の AGB 星プロジェクトと ESTEMA 計画が進行中であり、約 10 天体の老齢星について 22/43GHz 位置天文観測が進行中である。短期の将来計画では、VERA を用いた 43GHz の 2 ビーム観測の優位性を活かした年周視差計測を数天体で成功させる。また各種 AGB 星の代表的サンプルのメーザー重ね合わせ観測から励起機構解明の手掛かりを得る。並行して EAVN などの次世代東アジア VLBI アレイを用いた位置天文 VLBI の実証観測も進める。HINOTORI 計画により野辺山 45m 鏡参加による 86 GHz SiO メーザー源の VLBI 試験観測にも取り組んでいる。1.6 GHz OH メーザー源についても、臼田 64 m 鏡を用いた単一鏡観測を試行中だが、VERA に搭載された L 帯受信機を使った天馬局及び FAST との VLBI 試験観測の実現に向けて検討を進める。

中期 (第 4 期中期計画 2022 ~ 2027 年度)

位置天文による年周視差計測の定常的实施を現在の VERA 計画から KaVA や EAVN などの東アジア VLBI アレイへと連続的に接続し、老齢星の星周物質運動の理解を滞りなく進める。この期間に長周期 OH/IR 星に対する新たな変光星周期光度関係を確立し、広い周期/質量条件での振動モードや進化の統一的理解を試みる。この中で、ESTEMA の実施計画も見直し、これら測量観測との連携を確立する。

また、確立された周期光度関係による多数の星の銀河系内空間分布を得て、銀河系構造 (渦状腕, 中心核バルジ, 中心核ディスク) と AGB 星の関係を理解する。TAO による中間赤外領域での分光、モニター観測との比較から脈動周期と星周物理状態の時間的対応を理解する。さらに、野辺山 45m 鏡や EAVN 局との 86 GHz 及び 1.6 GHz 帯 VLBI 観測の継続的实施を実現し、それぞれ ngVLA や SKA-VLBI を用いた量産的なメーザー源測量／動画合成実現への道筋を付ける。

1 Appendix A: 星形成

1.1 研究背景

低質量星や付随する惑星系も含めた銀河系における星形成のほとんどは大質量星を含んだ星団形成によるものであり (e.g., 57)、大質量星の形成課程を理解することは星形成の定量的理解において極めて本質的である。また大質量連星は中性子星/ブラックホール連星の直接的起源であり、大質量原始連星系の形成過程を知ることが非常に重要である。低質量星形成と大質量星形成の最大の違いは、膨大な質量降着率を得るため、熱的ゾーン質量を超えた大量の高密度ガスが必要となる点に集約される。またそうした大質量の高密度ガス (=星団形成クランプ) は分子雲衝突/乱流衝突など、動的な圧縮によって作られるだろうという説がほぼ受け入れられている (e.g., 54; 8)。

1.1.1 降着による大質量星形成理論

衝突で作られた星団形成クランプはそのビリアル比によって二つの形成理論にわけられる。衝突後のクランプが強い乱流や磁場によってビリアル平衡にある場合、クランプ内に構造が形成され、密度が中心集中した大質量コアが形成される。この場合は乱流散逸後のコアは低質量星形成の際と同様に中心へ重力収縮を起こし、大質量星が形成される (Monolithic collapse: e.g., 67)。一方、クランプが最初から重力優勢な場合は、クランプ全体が直ちに重力不安定となり、複数のコアに分裂しながら星形成を始める (Global Collapse: e.g., 77; 56)。この場合質量の大部分は個別のコアに束縛されず、クランプ全体の重力ポテンシャルにしたがって中心へと流れ込み、中心付近のコアが質量を奪い合って成長する (Competitive Accretion: 10)。結果的に十分な質量を得た中心付近のコアは大質量星を形成する。

これら二つのシナリオはクランプの物理状態を起点とした理論的なモデルであるが、実は両者は着目する空間スケールに違いがあり、完全な対立概念とは言えない。すなわち、クランプの空間スケールはコアよりも1桁以上大きく、必然的に自由落下時間そのものが前者より長くなる。よって上記で述べたクランプの即時的な重力不安定とコア形成は並立しうることに注意が必要である。また両者の関係を考える上で重要な事実として、実際に観測されている大質量星無しコアの質量は $30 - 60 M_{\odot}$ 程度しかないことがあげられる (e.g., 94; 5; 6)。これはコアスケールでの星形成効率が50%程度であることを考慮すると、O型星を含む連星系を形成するには明らかに不十分である。このことから、強い乱流によって支えられたクランプはある程度大質量のコアを形成して星形成を行うが、その上でさらに周囲のクランプから追加の降着が起こるといった両者を合わせたシナリオが現実的であると考えられる (e.g., 104)。つまりどちらの理論に近いかは初期条件によって決まるコアの質量次第であり、定量的な問題であると言える。

1.1.2 大質量原始星進化

上記のように動的に圧縮された高密度ガスではいずれも $10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ と非常に大きな降着率が期待される。このような降着率下で成長する原始星は持ち込まれるエントロピーが膨大であるため、大きく膨張 ($10^2 - 10^3 R_{\odot}$) することが理論的に予想されている (47)。この場合中心部の温度は低温に保たれ、水素燃焼の開始質量が大きく遅延 ($20 - 40 M_{\odot}$) することが予想されている。また光球面も低温となることから従来に比べ紫外光子の量が制限され、輻射フィードバックやHII領域の形成による星周環境への影響も極端に変わることが予想される。これらのことから大質量原始星の詳細な進化過程は星団形成の初期過程を理解する上で本質的であるが、定量的な原始星進化は降着流の詳細な構造 (=円盤の構造) や系の冷却効率などに依存することが指摘されており (e.g., 48; 37; 63)、観測的な検証が必要である。

1.1.3 今後の原始星近傍観測に期待されること

ALMA 長基線が本格稼働した現在においても遠心力平衡にある円盤での質量降着率を測定することは容易では無い。しかし円盤を包む降着エンベロープでは降着優勢の運動が続々と検出されており、観測に用いた分子の存在比やダスト質量の導出に大きな仮定を含むものの、定量的に降着率が決定されている (e.g., 7; 72)。また星形成効率を決める主要因であるアウトフローの質量放出率については、同様の仮定を含むものの、ALMA稼働以前から比較的容易に決定可能である。

1.1.2で述べたように大質量原始星の進化経路と最終的星質量を決定するのは降着の詳細過程である。よってここで述べた (1) エンベロープから円盤への降着率、(2) アウトフローによる質量放出率、に加えて (3) 降着先となる原始連星の個数、の3つを統計的に明らかにすることができればひとまず定量的な理解を得たと言える。これに対して1.1.1で述べた二大理論はいずれの場合も重力収縮開始後の降着流の分裂については制限しておらず、実際近年のALMAによる観測から大質量原始星円盤の分裂によって連星形成が起こっていることが

示唆されている (e.g., 106; 72; 97)。したがって当面は高分解能の電波観測によって広い進化段階にわたって円盤の分裂過程を調べ、その時系列進化を理解することが重要である。

また将来的には ngVLA や SKA などを用いてさらに原始星近傍に迫るような観測を行うことが可能となるだろう。これらの次世代干渉計は cm 波帯で 1 ミリ秒角に迫る分解能と熱放射を検出可能 ($1\sigma < 10^3$ K) な感度を併せ持っており、5 kpc 以内の膨張した大質量原始星大気 ($\sim 10^2 - 10^3 R_\odot$)、10 kpc 以内の降着円盤内縁 (< 10 au) などを空間分解することで、円盤内縁の降着構造や原始星進化経路の多様性などを観測的に明らかにできると期待される。これにより原始星進化理論を確立することができれば、直接観測不可能な初代星形成機構の研究の進展にもつながると期待される。

こうした状況の下、我々星形成研究グループでは星間メーザーの性質をうまく活用した独自のアプローチによって降着現象研究を進めるとともに、次世代干渉計の稼働に向けて高感度かつ時間的自由度の高い大学望遠鏡の強みを生かした準備研究を行なっている。次節以降では研究の柱とした 3 つの研究計画について詳しい背景などを含めて補足する。

1.2 メーザーの周期変動を通じた質量降着率の導出: 杉山/米倉?

メーザーはレーザーと同様な放射機構で電波周波数帯にて観測される現象であり、星間空間では主に水酸基、水分子、メタノール分子、一酸化ケイ素分子、ホルムアルデヒド分子、アンモニア分子、などから検出される。その非線形性、および放射領域のコンパクト性 (1 天文単位) を背景に、通常の熱的な線形放射とは異なり、メーザー強度は短いものでは数日、あるいは 1 日以内で容易に変動する。その変動プロファイルは様々であるが、ここでは特に明確な周期性を示す強度変動に着目したい。

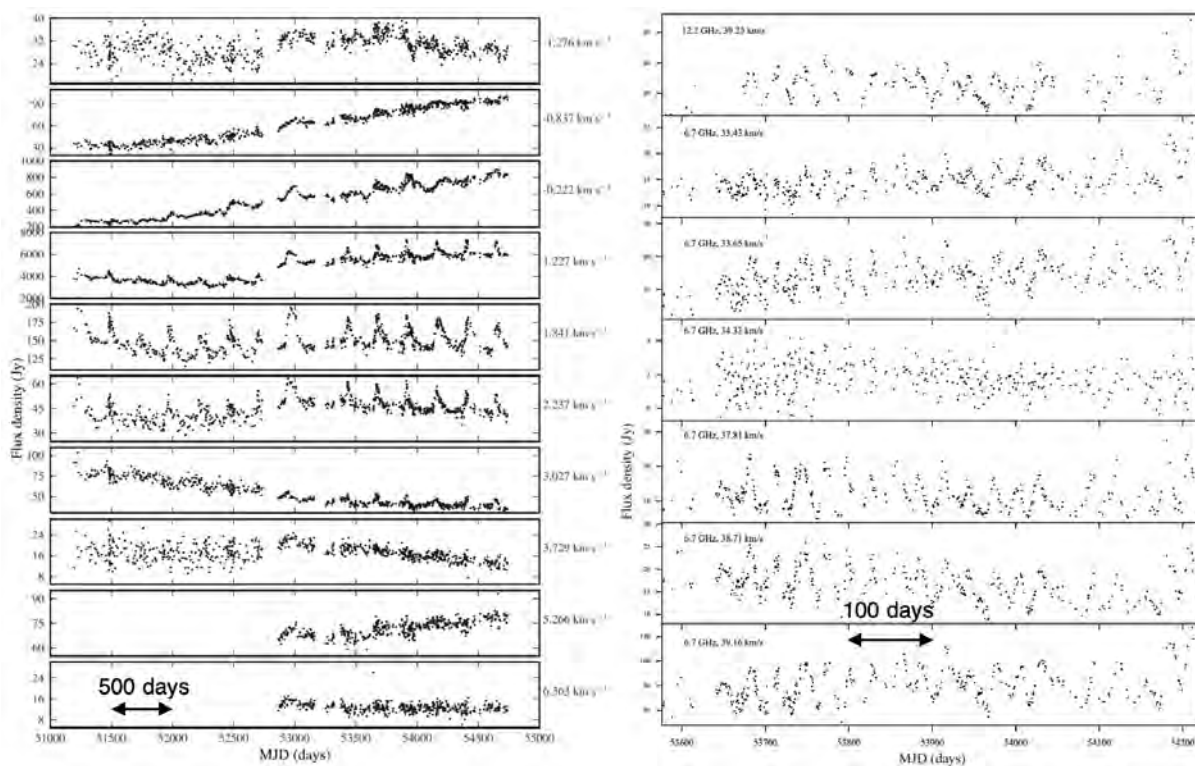


図 1.1: 大質量星形成領域で検出された 6.7 GHz および 12.2 GHz 帯メタノールメーザー周期変動の観測例: 左 - G 009.62+00.19 における周期 243 日の強度変動 (34)。右 - G 012.88+00.48 における周期 29.5 日の強度変動 (33)。

大質量星形成領域における周期的な強度変動 (以下、周期変動) の傾向は、大質量星形成領域オリオン大星雲中のオリオン KL 天体に付随する一酸化ケイ素メーザーの強度変動プロファイルを通じ初めて指摘された (101)。その後、大質量星形成領域 G 009.62+00.19 に付随する 6.7 GHz および 12.2 GHz 周波数帯でのメタノールメーザーで明確な周期 243 日を示す長期的な周期変動が検出された (32) ことを皮切りに、これまで約 60

天体で1ヶ月～数年に渡る幅広い周期での各種周期変動が確認されている(図1.1参照)。大学連携 VLBI の一角を担う日立 32 m 電波望遠鏡による2012年からの長期間・高頻度モニターでは、このうち30天体での新検出を報告している(105; 92; 91)。6.7 GHz および 12.2 GHz 帯メタノールレーザーは、主に周囲の赤外再放射線を励起源としている(22)ため、周囲の赤外再放射線が中心に位置する大質量(原始)星により暖められたダストからの放射であることを考慮すると、中心星および周囲のダスト温度の周期的な変化に敏感に反応し、これまで観測されてきたような周期変動を引き起こしている可能性が大いに考えられる。周期性の起源として提唱される複数の理論のうち、大質量原始星の脈動不安定モデル(53)はまさにこの可能性を理論計算しており、大質量原始星が零歳主系列(ZAMS)に到達する直前の膨張期に、大きな降着率 $10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 下において、原始星を取り巻くヘリウム外層での κ 機構による周期的な膨張・収縮現象が提唱された。本理論モデルでは、同時に原始星の光度 L_{star} と脈動周期 P の間の相関関係(周期-光度関係: 解析的には $L_{\text{star}} \propto P^{1.2}$) が予言されている(図1.2左)。この周期-光度関係は、光度のみならず、原始星の半径、質量、および原始星表面に降り積もるガスの質量降着率など重要な物理量との関係へも拡張可能な点においてユニークである(図1.2右)。これらの物理量は、現状および次世代の ALMA ですら空間的に解像できない微小な領域におけるものであるため、本周期-光度関係を観測的に検証することは、このような物理量を間接的かつ定量的に導出可能な方法を確立する上で最重要な課題と言える。1.1.2節にして言及したように、これらの物理量の定量的な評価・導出は、大質量原始星の詳細な進化過程を理解する上で必要不可欠である。

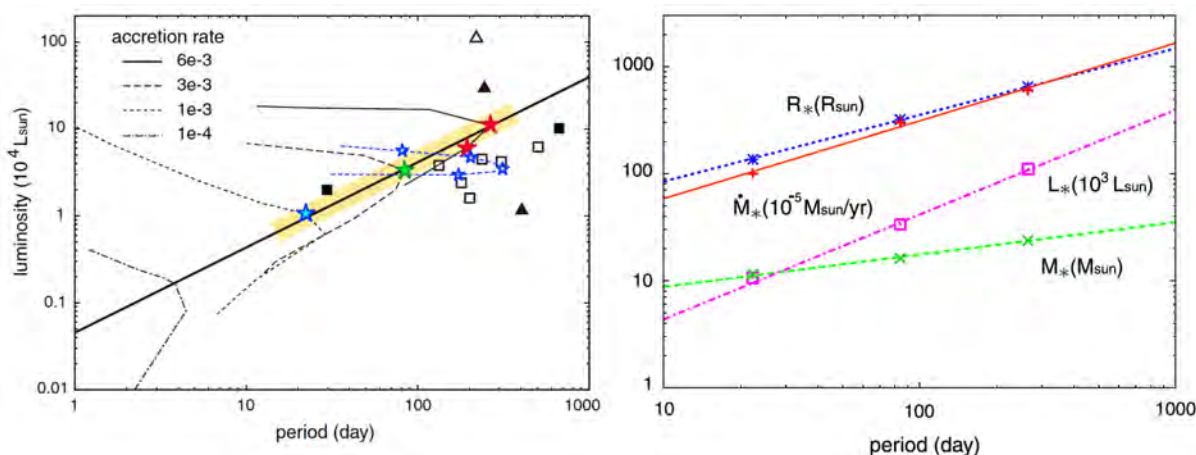


図 1.2: ((53) から引用) 大質量原始星の脈動不安定理論モデルから予言される周期-光度関係(左)と、各種物理量への拡張(右)。左において、星印は脈動の不安定計算点に相当し、色分けは質量降着率の違いを表している。右において、色の違いは、各種物理量(光度、半径、質量、降着率)それぞれの分類に相当する。また、縦軸は、各種物理量ごとに単位が異なり、それぞれプロット中の物理量横に示してある。

1.2.1 周期-光度関係の観測的検証

この周期-光度関係の観測的検証を達成する上で、特に本 White paper における VLBI を用いた観測として、具体的には下記 2 つの観測的アプローチを取る:

1. **VERA および EAVN を用いた周期変動天体の年周視差(距離)計測を通じた天体光度の高精度な導出:** 周期-光度関係の観測的検証を達成する上で、重要な点は、(i) 横軸: 周期の決定、(ii) 縦軸: 光度の決定、である。(i) の周期決定は、大質量原始星周囲を取り巻くダストからの赤外再放射線の温度変化に敏感な 6.7 GHz もしくは 12.2 GHz メタノールレーザーの周期変動から導出される周期を適用することで、高精度に決定可能である。一方で、(ii) の光度決定のためには、
 - (a) 赤外線総フラックスの決定
 - (b) 赤外線総フラックスから光度への変換

の 2 点を達成する必要がある。その内、VLBI では後者 (b) の”光度への変換”を高精度に実行する上で必要不可欠な「天体距離の高精度な決定」を、モデル依存性が無く信頼性および決定精度の高い年周視差計測による達成を目指す。現段階で、大質量星形成領域における周期変動は約 60 天体近くから検出されて

いるが、その半数以上の天体距離が kinematic distance 法により計測されており、その銀河系の円運動仮定に基づく導出方法、および near/far の不確定性により、おおよそ高精度な距離決定は困難と言える。光度への変換は距離の 2 乗に比例するため、距離決定精度の影響は大きい。近年では、年周視差計測を含む位置天文学をメインとしたミッション衛星 GAIA の 10 億を超える天体に対する年周視差計測結果、およびそれに基づく高精度な天体距離が公開されたが、周囲を取り巻くダストにおける可視光帯における吸収が顕著な大質量星形成領域に対しては、VLBI によるメーザーを対象とした位置天文観測が唯一の高精度距離決定法と言って過言では無い。また、VLBI を用いた位置天文計測プロジェクトとしては、アメリカの Very Long Baseline Array (VLBA) を用いた BeSSeL((80) など)、および VERA を用いた大規模カタログ ((103) など) が挙げられるが、いずれも大質量星形成領域における周期変動天体へ特化したものではない。従って、本プロジェクトでは、周期変動を示す天体の内、年周視差が未計測である天体に特化して、その年周視差計測を目指す。すでに、VERA を用い、周期変動天体に付随する 22.2 GHz 帯の水分子メーザーを対象とした年周視差計測を共同利用観測、および内部プロジェクトベースで 10 天体近くをターゲットとして開始しているが、大部分の天体に関しては、付随する水分子メーザーの強度が弱く、VERA での検出が困難な状況に陥っている。そこで、中期計画期間において、EAVN の 6.7 GHz 帯を主とした C-band、および 22.2 GHz 帯を主とした K-band の年周視差計測モードの性能評価および一般公開へ貢献し、イメージ感度・品質および空間分解能の高い EAVN での周期変動天体に対する年周視差計測達成を目指す。なお、前者 (a) の赤外線総フラックスは、別途近-遠赤外線のアークタイプデータ (2MASS, UKID, Spitzer IRAC, AKARI, MSX, MIPS, Herschel, など) をベースとした SED フィットにより導出する。

2. **EAVN を用いた強度変動の極大・極小時における周期変動メーザー成分の精密な同定:** 周期-光度関係の観測的検証において、メタノールメーザー周期変動の周期を横軸の脈動周期として用いる際、その周期変動メーザーが脈動不安定モデル起因であることが担保される必要がある。他の主要な周期変動を励起可能な理論モデルとして、Colliding Wind Binary (CWB: (102)) モデルと、スパイラル状の降着を伴う円盤の視線観測上に対するショックブロップの周期的生成モデル (76) が挙げられる。周期変動の変動プロファイルに見られる最も大きな違いは、「脈動不安定モデル起因の周期変動はサインカーブ的な連続的変動傾向を示すのに対し、CWB モデル起因では静穏期を伴う間欠的な変動傾向を示す」こと、かつ「前者 2 つのモデルでは、共通の大質量 (原始) 星に付随する全てのメーザー成分が共通の周期的な変動を示すのに対し、ショックブロップモデルでは一部のメーザー成分のみに対し周期変動を引き起こすことが可能」な点である。本 White paper では、後者の全成分 or 一部の成分が周期変動を生じる、という点に着目し、「脈動不安定モデル」起因の周期変動天体の明確な切り分け」を目指す。連続的ではあるが、一部のメーザー成分のみが周期変動を示している天体に関し、いくつかの天体では VLBI にて描かれる空間分布上において、1,000 au オーダーで分離した 2 つ以上のメーザークラスターを形成しており、片方のクラスターに位置するメーザー成分が周期変動を示すかわら、もう一方のクラスターに位置するメーザーは同様な周期変動を示さない、という観測例が見受けられた ((29) など)。このことは、「単一の電波望遠鏡では解像度の不足により、空間的に分離不可能なメーザー成分が、VLBI で描かれる高解像度なイメージにおいて個々のメーザー成分の変動を評価すると、明確に周期変動を示す成分とそうでない成分を 2 次元マップ上で切り分けることができ、その周期変動を引き起こすことが可能な空間スケールと、ひとつの共通な大質量原始星によってそれらの成分を励起することが可能かどうかを定量的に評価することが可能」となることを示唆している。実際に、(87) では G 009.62+00.20 において Australian Long Baseline Array (LBA) を用いた空間分布マップと単一鏡での周期変動タイミングを比較することにより、一部のメーザー成分のみが周期変動を示し、それらが一部の空間分離したメーザークラスターとしてかたまっていることが報告された。そこで、中期計画期間において、連続的な周期変動が一部のメーザー成分において検出されている複数の天体に対して、EAVN を用いた周期変動の極大・極小時それぞれにおける複数の VLBI 空間分布の取得、およびそれらの比較により、「2 次元空間分布上において、周期変動を生じているメーザー成分の正確な同定と、それらが占める正確な空間分布スケールの決定」を目指す。すでに、Yonekura et al. による EAVN 共同利用 2021A 期における観測のアクセプト (プロポーザルコード: EAVN21A-218) と一部実施をパイロット観測として開始している。

本節の最後にあたり、脈動起因が期待される原始星は膨張期にあるため、次世代干渉計 SKA/ngVLA を用いた大質量原始星の直接撮像にチャレンジする上で格好のターゲットにもなると期待されることを強調したい。

1.3 メーザーフレア機構と突発的質量降着”アクリーションバースト”現象の解明: 廣田(/杉山/米倉?)

1.3.1 メーザーフレアを端緒としたアクリーションバーストの観測的検出

大質量星形成理論では、「どのようにして強い輻射圧やジェット・アウトフローに逆らって、主系列星に達するまでの短期間に原始星が大質量を獲得するのか?」という基本的問題が論争中である。これは、星の質量を決める初期条件、星団と単独星形成機構の相違、宇宙初期の大質量星形成など、天文学の多くの問題に関連する重要課題となっている。そのため、大質量星形成における質量降着現象の解明は、星周円盤から大質量原始星への質量降着率やタイムスケール、星周円盤の力学的性質（重力不安定性、連星形成）、降着に伴うジェットやアウトフロー噴出機構など、大質量星形成の理解において本質的である。

星形成過程における質量降着現象は定常的ではなく時間変動をする、ということは近年観測的・理論的にも明らかになっている。特に、突発的な質量降着であるアクリーションバースト現象は、小質量星では FU Ori 型星, EX Lup 型星などの変光現象として認識されており (4)、多波長帯での観測や理論的研究が精力的に進められている。一方で、大質量星形成におけるアクリーションバーストは、理論モデルによる時間変動する質量降着率や放出率 (69; 68; 66) として小質量星同様にその存在は認識はされつつあるものの、一般的な大質量星形成の観測的研究同様の問題点を伴い、観測的な進展は依然として立ち遅れている。すなわち、大質量星形成領域の研究では (1) 星の初期質量関数からその形成自体が稀であること、(2) 小質量星に比べて進化が早く質量降着期の原始星段階では存在できるタイムスケールが極めて短いこと、(3) 上記理由から、太陽系近傍のサンプルが少なく遠方天体へのサーベイが不可欠であること、(4) そのため、観測では高感度・高空間分解能が要求されること、(5) またサンプルの探査には広視野サーベイによる多数の候補天体からの絞り込みが必要であること、などの観点から、観測的研究は依然としてチャレンジングなことが多いためである。

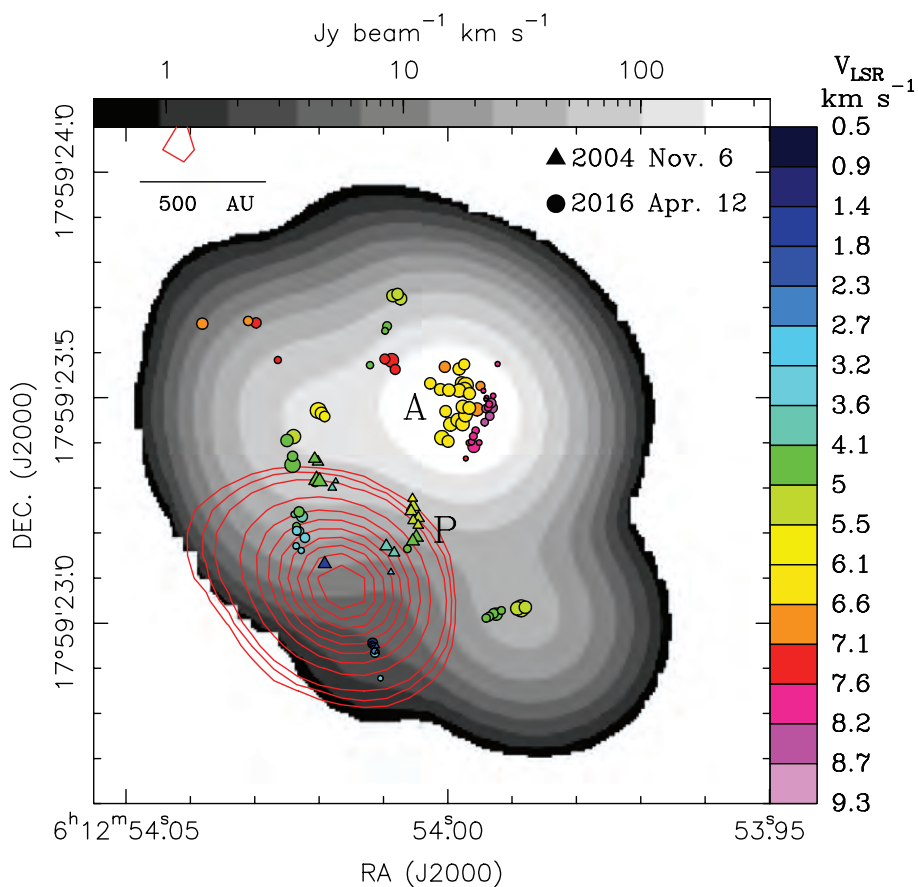


図 1.3: S255 NIRS3 における 6.7 GHz メタノールメーザー源の分布 (71)。観測は EVN によって行われた。丸と三角で示したフレア前後のメーザー放射領域の分布に大きな違いが見て取れる。グレースケールは VLA による 6.7 GHz メタノールメーザーの積分強度図、赤い等高線は VLA の 5 GHz 連続波放射の強度を示す。

予想不可能かつ観測天体の絞り込みが困難なアクリーションバースト現象ではあるものの、近年、メーザー源の長期間・定常的なモニター観測を活用することによって、3例の検出 (S255 NIRS3, NGC6334I-MM1, G358.93-0.03-MM1) に成功した事例が報告されている。メーザーは非線形現象で放射領域もコンパクト (1天文単位) なため、その強度が数週間から10数年のタイムスケールで変動する。特に、突発的に強度が10倍以上の増光を示すメーザーフレアは、1960年代末に電波天文観測によって22 GHz水メーザー輝線が発見されて以来、極めて明るい大質量星形成領域の水メーザー W49N(9; 45) や、太陽系から最も近い大質量星形成領域オリオン大星雲中の Orion KL 天体 (2; 31; 1; 1; 88; 40; 41, およびこれらの参考文献を参照) など、代表的なメーザー天体を始めとした存在が認識されている。特に、Orion KL では1970年代から過去に複数回のフレアが観測されており、最大では100万 Jy を超える全天で最も明るい電波放射も報告されている。また、6.7 GHz 帯のメタノールメーザーについても大規模モニター観測によってフレア現象が検出されており、そのうち2つの有名な大質量星形成領域 S255 NIRS3 と NGC6334I-MM1(30; 71; 49; 64, 他) では、メタノールメーザーフレア検出直後の赤外線から電波における追観測によって、大質量原始星周囲の降着円盤からの突発的な質量降着に伴う原始星増光が確認されている (16; 50; 58; 100)。また、フレア前後での周辺環境の温度変化により、メタノールメーザーの分布にも変化が現れている (図 1.3)。その後、同様のメタノールメーザーフレアは G358.93-0.03-MM1 という大質量星形成領域でも観測され (93)、アクリーションバーストに伴うメタノールメーザー領域の空間的な構造変化 (15) や赤外線における原始星光度変動 (90) が捕らえられており (図 1.4)、メタノールメーザーの急激な増光は大質量原始星でのアクリーションバーストによる光度増加に起因するという説が確立されつつある。また、フレアに伴う星周ガスの加熱に伴い、過去に検出例のない稀な種類のメタノールメーザーや OH メーザーなどの検出例も報告されており (11; 13; 18; 65)、メーザー励起機構や星周ガスの物理的環境の変化を捉えた研究へも発展しつつある。

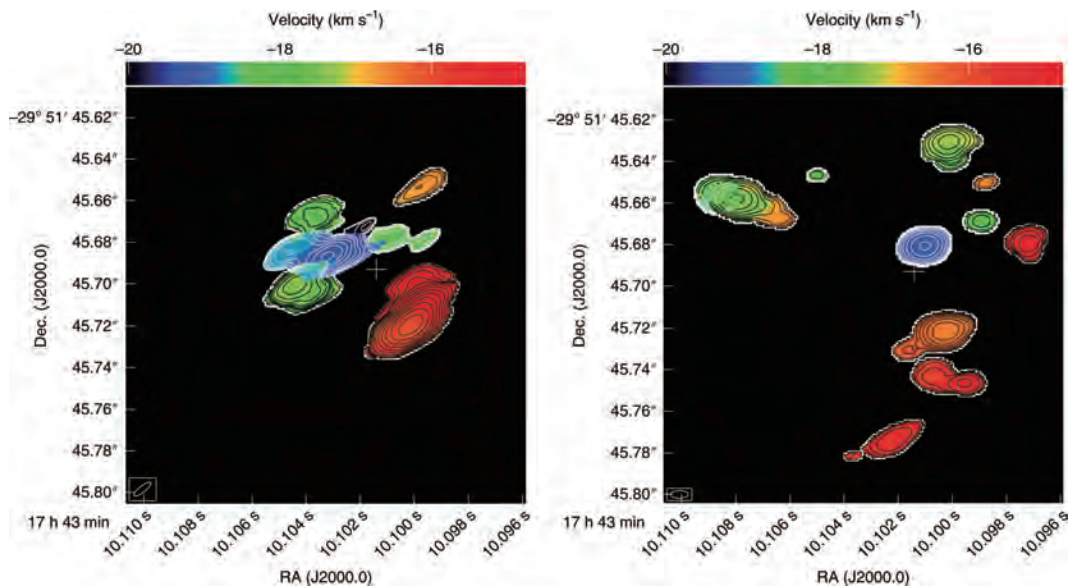


図 1.4: G358.93-0.03-MM1 で観測された 6.7 GHz メタノールメーザー源の構造変化 (15)。オーストラリアの LBA によって、フレアの検出から約 1ヶ月に 2 回の観測を行い、メーザー放射領域の膨張を捉えている。

1.3.2 メーザーフレア機構の解明

S255 NIRS3 においては、メタノールメーザーフレアで確認されたアクリーションバースト後には、電波連続波によるジェットの噴出も捉えられている (17)。このことから、すでに知られているオリオン KL などにおけるアウトフロー衝撃波領域での水メーザーフレアも、同じくアクリーションバーストが遠因という可能性が示唆されている。実際に NGC6334I-MM1 では水メーザーの突発的フレアも観測されており、アクリーションバーストによって噴出されたジェットが作るアウトフローキャビティから中心星の輻射が放射され、これによって大質量原始星から離れた場所での水メーザーが励起されてフレアを発生させる、というシナリオが提唱され

ている (12; 20)。一方で、S255 NIRS3 では、水メーザーのフレアは起こっておらず (38)、同様のメカニズムでの緩やかな水メーザーの増光のみが報告されている (38)。わずか数例の結果ではあるものの、メーザーフレアの有無やその活動星、励起源とされる大質量原始星における降着活動やジェット・アウトフローと周囲の相互作用には多様性があることが示唆される。

メーザーフレアの起源としては、アウトフロー・ジェットや星周円盤での相互作用の他に、連星系の衝撃波 (Colliding Wind Binary, CWB)、磁気圏活動 (磁気再結合) による温度や密度、輻射場など星形成領域の物理的環境変化 (1.2章参照¹)、あるいは Orion KL (図 1.5) などでは、メーザー源の微細構造変化 (複数のメーザー源が視線上に重なる「メーザーオーバーラップ」による増幅 24; 88; 14) など、天体ごと、輝線ごとに様々な説が提唱されている。近年のアクションバースト起源と考えられるメーザーフレアや周期変動メーザー天体の発見を端緒とした理論計算 (35; 36, 他) で進展はあるものの、統一的なモデル、あるいは多様性の起源について、解釈は確立していない。

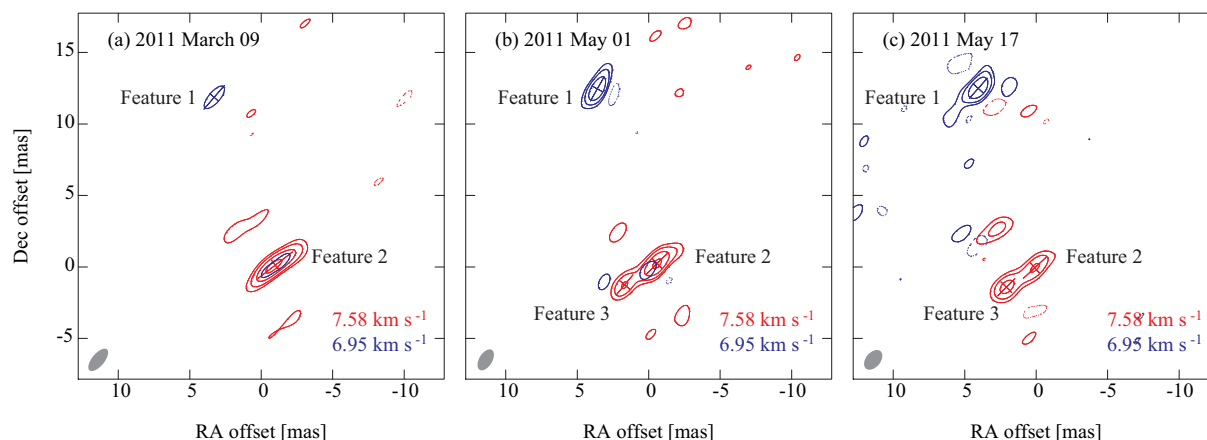


図 1.5: Orion KL において 2011 年に報告された水メーザーフレア (スーパーバースト、あるいはスーパーメーザーとも呼ばれる) における VERA を用いたイメージングと固有運動計測 (40)。

アクションバーストという大質量星形成において本質的な現象の解明において、メーザーフレアを端緒とした観測的研究は極めて重要な手段であり、そこから得られる大質量原始星の物理的・力学的性質を理解することが求められる。そのためには、メーザーフレア機構の理解自体も不可欠なテーマであり、これまで理解が進んでいないメーザーフレア現象の全体像を把握することも大質量星形成活動の様々な問題への解明につながるユニークなテーマと言える。メーザーは明るい天体であるため、単一鏡観測でのサーベイやモニターが比較的行きやすく、また、VLBI を用いれば十分高い解像度での観測も可能である。近年の ALMA と組み合わせた高感度・高解像度観測により、メーザーフレアの研究は一層の発展が見込まれる分野といえる。

以上を念頭に、本研究では、以下の具体的観測を実施する。このうち、太字で書いたものが VLBI による観測となる。

- 単一鏡によるメーザーモニター観測でメーザー時間変動を計測し、フレアを検出する。
- フレア発生後、ただちに (例えば 1 日以内) **メーザー源の VLBI 観測**を行い、メーザーフレアの絶対位置計測と励起源の同定を行う。
- 距離が不明の天体の場合は、VLBI 位置天文観測を開始し、1 年以上のモニター観測によって年周視差を計測する。
- **メーザーフレア直後 1-2ヶ月程度の間は 1 週間に 1 回程度の高頻度 VLBI 撮像観測**を行い、メーザー放射領域の伝搬を計測する (15)。
- **メーザーフレア後 1-2 年程度の間は 2-4 週間に 1 回程度の VLBI によるメーザー固有運動の計測**を行う。これにより、

¹本章では、周期性がない (あるいは周期が長く中期計画 6 年間でのモニターが不可能な) 単発のフレアを取り扱う。周期的に発生するメーザーフレアについては、前章の観点での研究に含む。

- 新たなフレアの発生 (49; 12; 20)
- 放射領域の構造変化やジェット・ショック領域の発生 (71; 38)
- メーザーオーバーラップによる微細構造変化 (40; 41; 14)
- 高感度な非熱的電波連続波放射の検出が可能であれば、CWB や磁気圏フレアの存在とその周期性

を明らかにし、メーザーフレアの起源について調べる。

- 上記 VLBI 観測と合わせ、赤外線から電波における多波長観測によって、中心星の光度変化やジェット生成、物理的環境 (温度、輻射場、分子組成など) の変化を調べ、大質量原始星におけるアクリーションバーストとアウトフロー駆動とその時間変動、周辺環境への影響を明らかにする。

1.3.3 VLBI 観測によるメーザーフレア研究計画

星形成領域におけるメーザーの時間変動については、国内では茨城大学や山口大学、国立天文台が各グループによって運用されている電波望遠鏡で観測を進めている。これらの望遠鏡では、6.7GHz のメタノールメーザー、および、22 GHz の水メーザーが観測可能であり、目的に応じて、1 日から 2ヶ月間隔でのモニター観測を行っている。国際的には、2017 年 9 月にイタリア・サルジニア島で開催された IAU Symposium "Astrophysical Masers" の際に結成された共同研究ネットワーク "Maser Monitoring Organization (M2O)" による世界約 20 か国 80 名からなる研究チームによる電波から赤外線でのモニター観測とも連携が進んでいる。これらのモニター観測によって、メーザーフレアの発見がなされた際には、M2O 全体にアラートが周知され、Target of Opportunity (ToO) 観測、または各観測所の所内時間、所長裁量時間 (Directors Decision Time, DDT) を用いた VLBI も含むフォローアップ観測が行われている。過去約 3 年間で 10 天体ほどのフレアのアラートが出されており、KaVA/EAVN、EVN、VLBA、LBA での観測がフレア発生から数日~1ヶ月以内程度に行われている (15)。

M2O との単一鏡モニター観測と連携した、メーザーフレアの VLBI フォローアップは今のところ一定の成果を上げているものの、将来的にはより組織的・系統的な観測的研究が求められる。これは、メーザーフレアがメタノール、水、あるいは過去の観測例が少ない SiO や OH などの異なる分子で相関するのか、天体によってメーザーフレアの発生機構に差異があるのか、というフレアの多様性の解明や統計的研究においては、より均質なデータによる比較が重要なためである。現在の研究では、各機関が独立してモニター観測を進め、VLBI フォローアップ観測も ToO や DDT プロポーザルの採択と割り当て可能時間の可否に依存するため、必ずしも理想的な時間間隔での観測や均質な VLBI データを得るには至っていない。将来的には、

- 各機関で組織的に天体や観測周波数を分担した単一鏡モニター観測
- フレア発生のアラートから可能な限り早い段階での VLBI フォローアップ観測開始
- フレア直後から定常状態に戻るまでの高頻度・定間隔・長期間の VLBI モニター観測

を実施する運用体制の確立が理想である。

VLBI 観測で求められるアレイの性能としては、既存の装置で達成される空間分解能や感度に対する大きな性能向上は本質的ではない。これは、メーザー自体がフレアをすることで強度が大きくなること、期待される固有運動もアウトフローやショック領域であれば $\sim 1 \text{ mas yr}^{-1}$ オーダー (5 kpc でも 24 km s^{-1})、輻射場の膨張によるメーザー領域の拡大であればその 100 倍以上 (15) と大きな値が期待されることによる。一方で、メタノールメーザーのフレア時には、中心星の輻射によって VLBI による合成ビーム以上の数 100 mas から 1 秒角程度の空間的に広がったメーザー成分の励起や構造変化が励起される可能性も示唆されている (71; 38)。また、オーバーラッピング現象による 1 mas オーダーの微細構造変化 (88; 41; 14) も報告されており、これらを捕らえるためには、KVN など短基線を含む高画質の VLBI イメージングは不可欠となる。メーザースポット数が少ない天体では、メーザー励起星の絶対位置に準拠した固有運動計測を行う必要がある場合もありうるが、この際には高速スイッチングに対応するアンテナ、微弱な参照電波連続波源の検出を可能とする広帯域記録装置、および、高精度アストロメトリのデータ較正が要求される。さらに、上記 ToO や DDT による早急な (例えばフレア発生のアラートを受けてから 1 日以内での) VLBI フォローアップ観測を可能とするダイナミックスケジューリングなど、運用面での改善も本研究の成功の鍵を握ると考えられる。

M2O と連携したメーザーモニター観測では、年間 2-3 例程度のメーザーフレア発生のアラートが見込まれるため、中期計画 6 年間では 10-20 天体程度のサンプル数が得られると期待される。これら全てに対して VLBI フォローアップ観測を実施すると想定している。メーザー源のフレア期間は最低でも 1 年、典型的には 3-5 年程度 (41; 38) 程度であり、この間に VLBI のモニター観測を継続して構造や光度の変化、固有運動計測を実施することが要求される。

1.4 希少な進化段階にある天体の大規模探査

大質量星形成で予想される大降着率 ($\sim a \text{ few} \times 10^{-4} - 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) を考慮した場合、数として主成分となる $10 - 30 M_{\odot}$ の星の主質量降着期はおよそ $10^4 - 10^5 \text{ yr}$ 程度続くことになる。このうち従来の星間レーザーが観測される時期は原始星が $8 M_{\odot}$ 以上程度まで質量を獲得した 10^4 yr から UCHII 領域を形成し、UV フィードバックによって周囲環境を破壊し始める 10^5 yr 程度の時期である。こうした天体は十分に進化した円盤やアウトフローなどの性質を調べる上では有用なターゲットであるが、首尾一貫した大質量星形成シナリオを確立するためにはさらに進化初期および末期に相当する天体へと観測ターゲットを広げる必要がある。

これに対して我々は大学連携 VLBI の高感度短基線および大学干渉計の mJy レベルの検出感度と時間的自由度を有効利用し、進化最初期および末期の希少天体に対する2つのフリッジ検出探査を進めている。両探査は 8 GHz 帯における電波連続波源の探査であり、想定する探査対象は熱放射源である。したがって現状の VLBI 観測の輝度温度感度 ($\geq 10^6 \text{ K}$) ではイメージング観測は不可能であるが、大規模探査を行って希少天体候補を洗い出すことで、ALMA などの現行の高分解能干渉計や、SKA/ngVLA といった次世代干渉計によるフォローアップ観測へと繋がる重要な準備研究であると言える。以下にそれぞれの探査について本文で割愛した詳細を述べる。

1.4.1 YI を用いた赤外線暗黒星雲中の原始星ジェット探査

原始星が $8 M_{\odot}$ に到達する以前の最初期進化段階 ($< 10^4 \text{ yr}$) については候補天体も含め報告された例はほとんどない (e.g., 84; 85)。大質量星形成の降着期がおよそ 10^5 yr とすれば既知の大質量原始星に対して 10% 程度の存在比が予想されるため、必ずしも発見不可能な確立ではないと期待される。そのような天体は以下のような性質が予想される。

1. アウトフローがコンパクトであり力学年齢が極めて短い
2. 角運動量が少ないコア/クランプ中心付近のガスから形成されたサイズの小さい円盤を伴う
3. 星質量は小さいが降着率が高いため、同質量の低質量原始星に比べて光度が大きい
4. フィードバックによる星周環境への影響が少なく、低温のまま初期環境が残されている

このような天体を探し出し、原始星を取り巻く円盤/コア/エンベロープ/母体クランプの性質を明らかにすることができれば、大質量星の形成シナリオを大きく制限することができるだろう。また初期の降着率を明らかにすることで、原始星進化経路にも定量的示唆を与えることもできると期待される。そうした最初期天体は (1) 低温高密度な赤外線暗黒星雲 (IRDC) 中に深く埋もれており、アウトフローキャビティも小さいことから近-中間赤外線で完全に暗い、(2) 総光度が低く遠赤外線で暗い点源、または検出されない、などの観測的特徴が予想される。実際に近年の ALMA による観測から Herschel 衛星によって検出された $70 \mu\text{m}$ で暗い IRDC 中に存在する双極アウトフローが 3 例ほど報告されており (26; 78)、最初期天体の候補であると考えられる。

これらの研究からも示されるように赤外線検出されない IRDC 中の原始星を捉える手法としてはアウトフローを利用した観測が有効である。一方で分子輝線に対する分光観測には高い感度が必要であり、大規模な探査は難しい。そこで我々は山口干渉計 (YI) を用いた電波連続波観測によっていわゆる電波ジェットの探査を行うこととした。当初計画における観測対象は Traficante et al. (2015) 2015MNRAS.451.3089T で報告された $70 \mu\text{m}$ で暗い星無し IRDC コア 667 天体であり、同定されたコア中心に向けて 8 GHz 帯での検出観測を進めている。

YI のコヒーレンス時間は実測で 30-60 分程度であり、十分な時間積分を行うことで数 mJy 程度の天体を検出することが可能である。これは J-VLA による最高感度の電波源探査 (e.g., 81; 82) には及ばないものの、典型的な大質量原始星の電波ジェットを検出することが可能な感度である。一般に原始星ジェットの力 (または運動量供給率) と電波光度には相関があることから (e.g., 82)、もしいずれ大質量に達する原始星が最初期から高降着率で成長するのであれば、比較的電波フラックスが大きいことも予想される。またこれらの J-VLA 探査は 100 以下の天体数に限られており、探査規模において我々に大きなアドバンテージがある。加えてこれらの観測はほぼ $70 \mu\text{m}$ で明るい星あり天体への探査である点も大きな違いである。

2020 年度に開始された本格的探査によってすでに 10 天体以上の原始星ジェット候補が検出されている。特筆すべき点として、これらの検出天体は全て J-VLA による 5 GHz 銀河面探査 (CORNISH: 43; 79) で非検出 (CORNISH の検出感度は $1 \sigma \sim 0.4 \text{ mJy beam}^{-1}$) の天体であり、右肩上がりのスペクトルを持つ原始星ジェットの特徴と一致している。

以上のように我々の探査は感度という点で一定の限界があるものの、星無し IRDC 内の若い原始星を探し出すという目的に対して十分な成果が期待される。また今後の観測帯域拡張や両偏波同時観測などによる感度向上次第ではより暗い天体も含めてターゲットの増加が見込まれる。

また YI の時間的自由度を生かしたもう一つの計画として、電波ジェットの変動性モニターも並行して行っている。例えば大質量原始星ジェットの活動性としては、Motogi et al.(2016)(73)において H₂O メーザーを介したモニター観測から、1 年程度のタイムスケールでジェットの再帰的射出と加速が起こっていることが報告されている。一方、大質量原始星からの電波ジェットに対しては年単位のモニター観測しか報告されていない(e.g., 23)。そこで我々はジェットの短期変動を捉えることを目的とし、検出された天体に対して月単位のモニター観測を行なっている。

ジェットの活動性に関する起源としては、まず射出領域へ流れ込む降着量の変動が考えられるが(e.g., 60; 61)、例えば円盤の重力不安定に伴うような大きな降着率変動のタイムスケールは比較的長く、短期変動に関連する可能性は低いだらう。Motogi et al.(2016) でみられたような短時間での変動の起源については、数値計算における時間分解能の問題から理論的研究は少ないが、例えば Saiki & Machida (2020)(83)において低質量原始連星の軌道周期に依存してジェットの変動が起こることが報告されている。仮に同様の現象が起こるとすれば、近接連星が多いとされる大質量原始星では比較的短いタイムスケールでの変動が予想される。このような場合、モニターを通じて最初期の円盤分裂による原始連星の形成確率や連星距離などに示唆を与えることが期待される。また、より単純にジェットの射出による磁気圧の緩和と円盤回転による磁気圧の増幅が交互に繰り返されることで射出領域の回転タイムスケール程度の変動が起こる可能性も考えられる。通常射出されるジェットの速度(大質量星形成では $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$) は概ね射出地点の脱出速度程度であり、ここから逆に推定される射出領域のスケールは 1 au 以下と、1 年以下の変動が十分に起こり得るスケールである。

いずれの場合も直接解像が困難な円盤内奥領域の情報を得ることが期待されるが、一方でモニター観測のみで詳細な起源を明らかにするのは困難でもあり、最終的には ALMA や SKA/ngVLA によって au スケールの空間情報を補完することが必要である。

1.4.2 JVN 短基線による極小 HII 領域の探査

すでに述べたように、大質量原始星進化的理論の最大の特徴として、水素核燃焼の開始質量が降着の質と量に大きく依存するという点があげられる。このことからもし核融合開始直後の星質量について調べることができれば、原始星進化的理論を観測的に検証することができる。さらに統計的に着火時の星質量を統計的に調査することで降着過程の多様性について明らかにすることもできるだろう。

一般に零年主系列に到達した星の指標として HII 領域の付随が用いられる。大質量原始星はケルビン・ヘルムホルツ収縮のタイムスケールが降着のタイムスケールがより短くなった時点で膨張から収縮に転じ、内部温度を上昇させて水素燃焼に至る。一方で HII 領域の形成を引き起こす UV 光子の量は星の表面温度に依存するため、星の収縮とともに上昇する。したがって核燃焼の開始と HII 領域の形成は天文学的タイムスケールではほぼ同時的に起こると考えて良い。

形成された HII 領域の進化は (1) 電離進行と (2) 圧力膨張の二つの段階に分けられる。特に静的な星周ガス構造を考える場合、前者は後者に比べて一瞬であり、観測される HII 領域の多くは圧力膨張または圧力平衡の状態にあると考えられる。一方周囲から降着がある場合は降着物質によって UV 光子が消費されるため、HII 領域の形成が容易に阻害されることが指摘されている (21)。現実的には降着流は非球対称であり、円盤やアウトフローによって光子が遮蔽されるため、完全に HII 領域の形成が阻害されることはない(e.g., 96; 95)。

観測的には HII 領域の進化段階は主にサイズと電波再結合線 (RRL) の線幅で切り分けられる (42)。基本的にはサイズが小さく線幅が広いほど若い HII 領域と認識されている。また HII 領域と電波ジェット/恒星風による電波連続波も RRL の線幅と赤外線/電波光度比によって切り分けられる。

単純な電離平衡を考えた場合、HII 領域の下限サイズはストームグレン半径 (r_s) で与えられる。一方大質量原始星の重力を考える場合、もし r_s が電離ガスに対する重力半径 (r_g) 以下であれば、HII 領域は圧力膨張に移行することができず、 r_g が下限サイズを与えることになる。 r_g の表式は重力エネルギーとガスの運動エネルギーの釣り合いから、中心星の質量を M_* 、電離ガスの音速を v_e 、電子温度を T_e として以下のようになる。

$$r_g \sim \frac{GM_*}{v_e^2} \sim 10^2 \left(\frac{M_*}{20 M_\odot} \right) \left(\frac{T_e}{10^4 \text{K}} \right)^{-1} \text{ au} \quad (1.1)$$

よって $20 M_\odot$ 、 10^4 K の場合、 10^2 au 程度の極めてコンパクトな HII 領域が予想される。既知の HCHII 領域の最小サイズは 300 au 程度であるが、これは現行の電波干渉計の分解能に基づく観測バイアスである可能性が高い。例えば HII 領域の観測に用いられる 10 GHz 帯での J-VLA の最高分解能は 200 mas 程度であり、比較的近傍の大質量星形成領域 ($2 - 3 \text{ kpc}$) で $400 - 600 \text{ au}$ に相当する。Tanaka et al.(2017) では $10 - 100 \text{ au}$

程度のコンパクトな初期 HII 領域がアウトフローの電離によって広がるまでのタイムスケールを 10^4 yr と見積もっている (95)。一方 Churchwell (2002) では UCHII 領域の前駆段階の寿命および UCHII 段階の寿命を 10^5 yr としており (21)、統計的な存在確率は UCHII 領域に対して最大で 10 % と見積もられる。これらのことから数は少ないと予想されるもの、 10^2 au 程度の HII 領域が未観測の状態で存在している可能性があると考えられる。

そのような極小サイズの HII 領域 (以下、ECHII 領域) を探査するためには 100 mas 以下程度の空間分解能と、 10^4 K を検出可能な輝度温度感度が必要である。これは熱的制動放射が主成分となるセンチ波帯において、既存の結合型干渉計では J-VLA の A 配列がほぼ唯一の解である。しかしながら上でも述べたように J-VLA の最高分解能での電波源探査は観測可能な天体数に限りがあり、希少な ECHII 領域の大規模探査には不向きと言える。そこで我々は JVN の茨城-鹿島基線に着目した。

茨城-鹿島基線は 8 GHz でのフリッジ間隔がおおよそ 100 mas 程度である。また 30 m 級望遠鏡間の高感度基線であるため、10 分程度の積分で $1\sigma \sim 10^3$ K 程度と ECHII 領域を十分検出可能な輝度温度感度を達成できる。さらに 1 基線であることから観測アロケーションも容易であり、多数天体の観測も可能である。

観測対象は J-VLA による CORNISH 探査 ($1''.5$ 分解能) において未分解電波源としてカタログされた 662 天体である。我々はこのうち 250 天体に対して 1 基線 VLBI 観測を行い、122 天体に対してフリッジを検出した。このうち 38 天体については、その後行われた山口-茨城の長基線 (8 GHz でのフリッジ間隔 ~ 8 mas) によるフォローアップ観測において非検出となり、 10^5 K 以下の低輝度電波源の候補であることが明らかになった。特にこのうち 7 天体については大質量星の表面温度程度 ($\sim 3 \times 10^4$ K) の輝度温度を示した。

これは一般的に知られている HII 領域の平衡温度 (10^4 K) に対してやや高温であるが、HII 領域の温度は金属量やガス密度に依存しており、金属量が低く高密度なほど高温となる (e.g., 3)。ECHII 領域は高温 ($> 10^2$ K) かつ高密度 ($> 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) な円盤中心領域に埋められていると考えられ、自身の電子密度も十分高い ($> 10^7 \text{ cm}^{-3}$) ことが予想されるため、より星の表面温度に近い温度を示す可能性もある。今後は J-VLA や ALMA などを用いて詳細な SED 測定や空間構造の取得を行い、検出された低輝度天体の正体を明らかにする予定であるが、仮にこれらが ECHII 領域ではないとしても、実際に VLBI によって熱放射を捉えうるということを示した画期的な試みであると言える。

本計画は残念ながら鹿島局の運用終了に伴い一次探査の休止を余儀なくされてしまった。継続のためには例えば同程度のフリッジ間隔を持つ短基線 VLBI 観測網が必要である。代替アレイの条件としては、観測対象が光学的に厚い HII 領域であるため 8 GHz より高い周波数でも問題はないが、受信機感度と大気雑音の観点から 22 GHz 以下が望ましいと考えられる。また低周波側については HII 領域のフラック密度が減少することや、前景に存在する HII 領域の影響が無視できなくなる可能性があるため、8 GHz から極端に低い周波数は現実的ではないだろう。他の科学分野も含め、もし今後 8 - 22 GHz 帯の高感度短基線 (例えば宇宙研の白田/美笹と国立天文台野辺山 45m 間の基線など?) のニーズが高まる場合、具体的研究テーマの一つとして提案したいと考えている。

また本計画の発展形としては SKA-1 を用いた探査がより現実的である。SKA-1 では 15 GHz 帯での分解能が 30 mas であり、わずか 1 分積分での感度が 400 K 程度と極めて高い感度が得られる。この場合既知の大質量星形成領域の過半数を含む 5 kpc 内の天体に対して ECHII 領域の探査が可能となると予想される。さらに Full SKA や ngVLA であれば銀河系外縁部 (~ 10 kpc) まで手が届くことから、星進化に対する金属量の影響などを調査することも可能になるかもしれない。

1.4.3 SKA/ngVLA 時代へ向けて

すでに述べたように、これら二つの探査は直接的に将来の VLBI 観測ターゲットを増やすことを目的としたものではない。しかしながら mas スケールの超高分解能観測という観点では、既存の国内 VLBI と Full-SKA/ngVLA は地続きであり、分解能を維持しながら感度を大幅に補完することにより、これまでの VLBI 観測のノウハウを生かしつつ大きな科学的発展を見込むことができる。

例えば ngVLA では円盤から星表面へ流れこむ降着流構造やジェット/アウトフローの駆動領域の解像、近接した原始連星の分離とその軌道運動の直接検出などが現実的に期待され、また究極的には膨張期にある大質量原始星大気の詳細な直接分解撮像の可能性もある (98)。これについてはもちろん Full-SKA でも周波数の違いはあれど同様の観測が可能である。本計画で述べた希少な天体も含め、進化最初期から主質量降着期を経て零年主系列段階までの広い進化段階においてこうした観測を実施し、統計的な性質を明らかにすることで、まさしく銀河系における大質量星形成の標準シナリオを確立することができるかと期待される。

さらにこれらの次世代干渉計では大/小マゼラン雲における大質量星形成についても現実的な積分時間で 1000 au スケールの構造を撮像観測することができるため、金属量に応じた原始星進化の違いを本格的に検証することができるかもしれない。こうした知見はより一般化された原始星進化理論の確立を通じて、初代星形成やそれに伴う種ブラックホールの形成の理解にも繋がるかと期待される (e.g., 46; 86)。 h

2 Appendix B: 終焉期の星

2.1 AGB 星研究の意義

誕生時の質量 (初期質量 M_*) が $1-8M_\odot$ の中小質量の星は、その進化の末の終焉期に漸近巨星分枝 (Asymptotic giant branch ; AGB) 星 と呼ばれる段階へと至り、多様な元素 (酸素・炭素・窒素など) を恒星の内部で合成する。この段階の星はその中心に炭素と酸素が縮退した核を持ち、その外側にヘリウムや水素の燃焼層が形成される。さらに外側には対流層ができ、こうした動的な構造による対流の働きによって星の内部で合成された様々な元素は、星の表面へと汲み上げられてゆく。更に進化が進むと星の半径は非常に大きくなり、それにつれて表面における重力は弱まってゆき、星の表面近くにある物質は星の重力的な束縛を逃れて徐々に星の最外縁部から宇宙空間へと放出されてゆく。この現象は質量放出と呼ばれている (図 2.1)。星表面から離れるにつれて物質の温度は低下し、分子ガスは凝集してダストが生成される。ダストは星からの輻射を効率良く受けることで加速を受け、星を離れて外側へと向かう物質流の速度は大きくなってゆく。ダストとガスの混合体は巨視的には粘性を持つ流体として振る舞い、ダストが輻射による加速を受けることでガスも同時に星の外側へと運ばれてゆく。AGB 星は極めて大きな質量放出率 ($dM/dt = 10^{-7} - 10^{-4} M_\odot \text{yr}^{-1}$) を示すダストの主要な供給源であり、実に銀河空間を漂うダストの 90% が、このような AGB 星起源であると考えられている (89)。こうして星を離れて宇宙空間へとまき散らされたダストやガスは、やがて次の世代の恒星や惑星の材料となり、ひいては私たちと同じ生命を構成する大切な要素ともなる。ここに我々は宇宙における物質の輪廻を見ることが出来る。

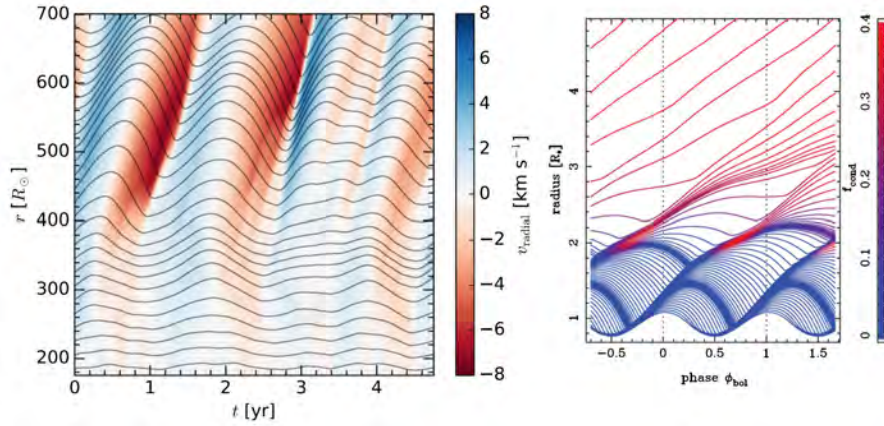


図 2.1: ショックによる恒星大気の上昇と加速の様子 (44)。(左) 三次元モデル計算による星周ガスの動径方向速度を太陽半径 R_\odot 単位で示したものの (27)。青色は膨張、赤色は収縮する領域を示す。黒は平均化されたガスの動き。AGB 星の典型的な恒星半径である $2-3\text{au}$ は $400-600R_\odot$ に対応する ($1\text{au}=215R_\odot$)。(右) 典型的な C-rich ミラ型変光星の外層大気モデル計算。赤色はダスト形成後の領域。青色はダストフリーな領域を示し、およそ左図の範囲と一致するスケールである。

星の主系列段階の滞在時間はその誕生時の質量 (初期質量) に依存しており、例えば Iben (1967) (51) によると、質量 $M_* = 2.25 M_\odot$ の星で約 5 億年、質量 $M_* = 3 M_\odot$ の星で約 2 億年と、質量が大きいほど主系列段階の滞在時間は短い。質量が $5 M_\odot$ 以上になると主系列滞在時間はわずか数千万年となり、反対に $2 M_\odot$ より軽くなると主系列滞在時間は数十億年のオーダーになる。初期質量関数 (Initial mass function ; IMF) を考えると、初期質量が $3 M_\odot$ ほどの星と $1 M_\odot$ ほどの星の存在数の比は $10^{-1.5}$ ほどであり、小質量星の数の方が圧倒的に多い。主系列を抜けた星は赤色巨星分枝などを経て、主系列滞在時間に比べると十分に速やかな時間スケールで AGB 段階へと至り、質量放出をはじめることになる。中小質量星の最終段階である白色矮星の典型的な質量が $0.6 M_\odot$ であることを考えると、初期質量が $2.25 M_\odot$ より重い星については誕生から数億年経ったあとに AGB 星として過ごすわずかな時間の間に、自らの質量の大部分にあたる太陽質量の何倍もの物質を銀河間空間へと還元していることになる。小質量星が数十億年におよぶ長い主系列滞在時間を抜けた末に、たかだか $1 M_\odot$ 程度の物質をまき散らすことを考えると、銀河間空間への物質還元の様子は、中質量と小質量の星で大きく異なると言える。

中小質量星は AGB 段階を抜けた後、最期には中心星が白色矮星へと進化し、まき散らされた外層の大量の物質はやがて多彩な形状を見せる惑星状星雲 (Planetary nebula; PN) へと進化する。その前駆段階である AGB 星もその中での進化過程を細分化することができる。比較的星周ダストが薄く、可視光域でも大振幅の

変光が観察されるような典型的な Mira 型変光星は AGB 段階の初めの時期にあたり、やがて星周ダストを発達させて赤外線領域で放射が卓越するような段階へと至る。星を離れたダストはやがて星間空間へと到達し、星間空間を飛び交う高エネルギーの放射による光乖離を受けた H_2O 分子が OH ラジカルを作り、OH メーザーが検出されるようになる。この段階はその観測の特徴から OH/IR 星とよばれる。AGB 星の中での細分化された進化プロセスや、その後に惑星状星雲が示す幾何学的形状の多様性の原因もまた十分に理解されていない。

AGB 星では、光球表面を起点として半径の数倍から数十倍の距離においてダストが形成されて、加速を受けることが知られており (図 2.2)、またそうしたダスト生成と加速が起こる領域では古くからメーザー放射の存在が確認されている。典型的なメーザー源の種類として、星に近い場所から順に一酸化ケイ素 (SiO)、水 (H_2O)、水酸基 (OH) メーザーが励起されることが知られている。星の外縁部、すなわち質量放出が起こるまさにその現場において励起されるメーザー放射は、質量放出の物理的な様子を描き出すための大変重要な観測対象であることはすぐにわかるであろう。

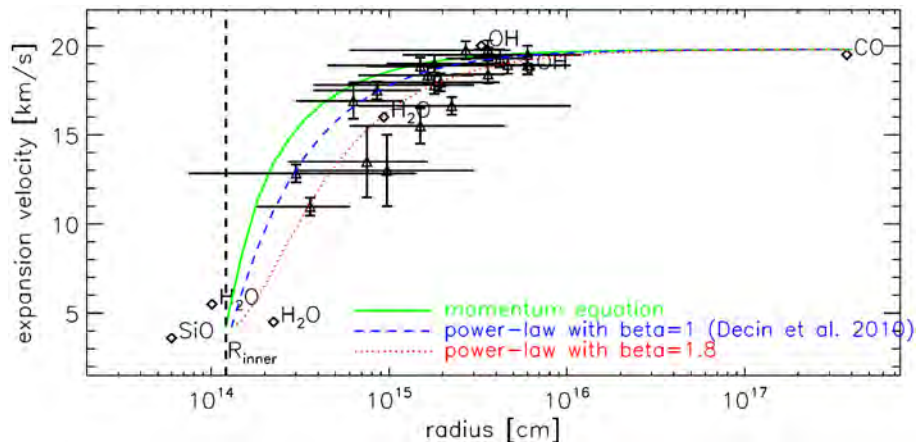


図 2.2: M 型星 IK-Tau の星周物質の速度構造 (44)。ダイヤモンド \diamond は H_2O , SiO , OH メーザー観測から得られた速度、三角 \triangle は Herschel Space Observatory での H_2O 輝線の観測から得られた速度を示す。星から外層へと向かうにつれ、膨張速度の増加がみられるが、 10^{15} cm 周辺では星からの動径方向に依然として大きな不定性が残る。

宇宙空間に存在する元素の合成とその化学組成に大きく寄与する AGB 星およびそこから質量放出の様子を、その進化の時間的経過や銀河系内での空間分布や運動と関連付けて理解することは、銀河系で重元素を含む物質がどのように生成されて拡散されるのか、その歴史の理解へと繋がってゆく。その中では、AGB 星から惑星状星雲への進化過程を明らかにすることもまた同時に重要となってくる。またメーザー放射の励起機構それ自体もまた、今もって十分に解明されたとは言い難く、様々な種類のメーザー放射を、その空間的位置関係や時間的相関などの観測的事実を蓄積することにより、より詳しい理解へと繋がる。

星は、内部で合成した物質を自らの周囲へまき散らすことで、やがてそれらの物質 (ダストやガス) に厚く取り囲まれ、すっかり埋もれた状態になる。この様な終焉期の星は、周囲を取り囲む厚いダストによる吸収の為に可視光や赤外線による観測が困難となり、その点においても赤外線や電波による観測が重要となる。とくに電波干渉計による観測は高い空間分解能を誇り、星の周囲の物質の様子を明らかにする上でたいへん重要な観測手法となる。

我々は長年、VLBI 観測の手法を用いて、AGB 星の星周に存在するメーザー源の観測的研究を行ってきた。これまでの国内の主な観測装置であった VERA および日本 VLBI ネットワーク (JVN) の VLBI 網に加え、近年は新たに韓国 VLBI ネットワーク (KVN) や東アジア VLBI ネットワーク (EAVN) による観測を推進している。いくつかのメーザーの種類の中でも、特に 22 GHz の H_2O メーザーと 43 GHz の SiO メーザーに対する、VLBI 撮像や位置天文観測の技術に長けており、 H_2O メーザーや SiO メーザー源の運動や年周視差の計測に基づいて、老齢星の周囲の物質の分布やその運動を定量的に計測した実績を多く持っている (52; 74; 55; 70)。観測対象はこれまで Mira 型星、準規則型 (SR) 変光星、赤色超巨星などを主としてきたが、現在は特に質量放出が著しい OH/IR 星も対象に加えて観測を進めている。特に、43GHz 帯の SiO メーザーの空間的重ね合わせや、1000 日を超えるようなとりわけ長い変光周期を示す OH/IR 星の位置天文観測については、これまでの経験や VERA の 2 ビーム位相補償観測だけにより実現される高精度な位置天文 VLBI 計測の精度と空間分解能の優位性を活かし、世界に先駆けた観測的研究を進めている。VLBI によりもたらされる au スケールでの星周物質の空間的構造を、日単位の時間分解能で捉える試みは他波長には無い特徴でもある。

電波以外の波長に目を向けた時、高齢星を研究対象とする国内の天文コミュニティでは、赤外線観測が盛んである。近赤外線に加えて、最近では中間赤外から遠赤外の波長帯でも観測装置の開発や運用も進む。一例として東京大学アタカマ天文台 (The University of Tokyo Atacama Observatory ; TAO) 計画があり、TAO グループとの研究協力を進めている。ダストに取り囲まれた高齢の AGB 星では、観測される電磁波の起源が、光球からの直接的な放射であったり、または暖められた星周のダストからの赤外線帯での 2 次放射であったりと、星を取り囲むダストの光学的厚みに応じて様々に変化する。放射の特性を把握するためには、可視光から遠赤外線までの SED 取得が重要であり、他波長/他機関との連携で SED の時間変化把握なども視野に入れる。

2.2 AGB 星研究における位置天文 VLBI の重要性

AGB 星の星周物質分布や運動、加速度などを詳細に知るためには正確な距離が重要である。距離の計測には様々な手段があるが、年周視差法は星の性質に一切の過程を置かず、幾何学的に距離を導出できる点において、他とは明確に区別される信頼性の高い手法である。可視光による年周視差の計測では、現在 Gaia が重要な役割を果たしているのは事実だが、AGB 星は星周ダストによる減光や赤化を受けるため、可視光域では暗くなる。また可視光で観測される大きな光球サイズと、その表面に生じていると考えられる輝度のムラとその時間的揺らぎ (19) のため、必ずしも有効な年周視差計測が行われているわけではない。Gaia にとって AGB 星の年周視差計測は、主系列星などと比べると観測が困難な対象なのである。図 2.3 では VLBI と Gaia DR2 による年周視差の相対誤差を比較した。VLBI による AGB 星の年周視差計測が Gaia DR2 に比べて小さな相対誤差を示すことが分かる。AGB 星はその一時期を長周期変光星として過ごすことが知られている。変光周期が 1000 日に達するような長い周期を持つ AGB 星は、時にはスーパーウィンドと呼ばれるような極めて高い質量放出率 ($dM/dt = 10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$) を示し (図 2.4)、星周ダストが極度に発達した Extreme-OH/IR 星としても知られる。こうした星では可視光は非常に強い減光を受けて暗くなり、近赤外線や中間赤外線でしか同定できないような星もある。一部の星では、Gaia の公開データにそのエントリーすらない状況である。したがって、変光周期を得る際に既存のデータベースに頼ることが出来ないこともある。そこで我々は、可視光や赤外線での測光モニターが困難な天体に対して自身で観測的に決定することも試みている。図 2.5 はその一例であり、VERA 入来局の H₂O メーザーの積分強度の時間変化から変光周期を導出した NSV17351 の結果を示している。

VLBI では AGB 星の星周に分布するコンパクトな H₂O や SiO のガスを追跡するため、それらのガスの幾何学的安定性がある場合には年周視差の計測が可能となる。特に 43GHz に置いて位相補償観測による年周視差の計測は次の 2 つの点で有利である。(1) まず 43GHz 帯での合成ビームサイズは 1mas を下回るため、視差の計測精度が上がる。(2) 次に AGB 星のメーザー検出率は一般的に SiO メーザーが H₂O メーザーを上回るため、計測の機会は 43GHz の方が多く期待できる。しかし 43GHz の位相補償では大気のコヒーレント時間が短くなるために実時間での位相補償が可能な現在の VERA2 ビーム機構が極めて有効である。我々はすでに 43GHz の SiO メーザーによる数天体での位相補償観測を成功させている (75)。

2.3 研究の課題とその手段

2.3.1 AGB 星周囲でのメーザー励起機構の解明と星周縁の形態学および運動学

中小質量星の終焉期にあたる AGB 星では、星周に複数種のメーザー放射が励起されることが古くから知られており、その物理的な励起機構については、放射励起と衝突励起の 2 つが代表的なものとして提唱されてきた。しかし、支配的な効果がどちらであるかの切り分けや、それを観測的に裏付けることは容易ではなく、これまで様々な観測的研究が行われてきた。今後我々は、従来の観測では達成できなかった数種のメーザー放射の同時撮像などを VLBI で行い、その時間的・空間的な変動の様子を知ることにより、励起機構の解明を目指す。また、VLBI によるメーザー放射のデータだけではなく、熱的放射の情報も組み合わせることが必要となってくる。

2.3.2 AGB 期から Post-AGB 期にわたる質量放出現象と進化過程の理解

AGB 星について、その進化段階を若い方から順に Mira 型期 (SR も含む)、OH/IR 星期、非変光 OH/IR 星期、Post-AGB 期、Pre-PN 期に細かく分類し、各段階におけるダストやガスなどの星周物質が示す幾何学的な分布形状、速度や加速度などの運動状態の特徴を明らかにし、それらの起源を解明していきたい。星の質量と光度の差異にも注目する。そのためには VERA/JVN 及び EAVN などの VLBI 網を主に活用して、ミリ秒角 (mas) 程度の角分解能で広がった星周メーザーの構造とその運動を捉える。VLBI 以外の様々なデータと組み合わせることで光球半径や表面温度などの星そのものの物理量を決定し、それらとメーザー放射分布や星周

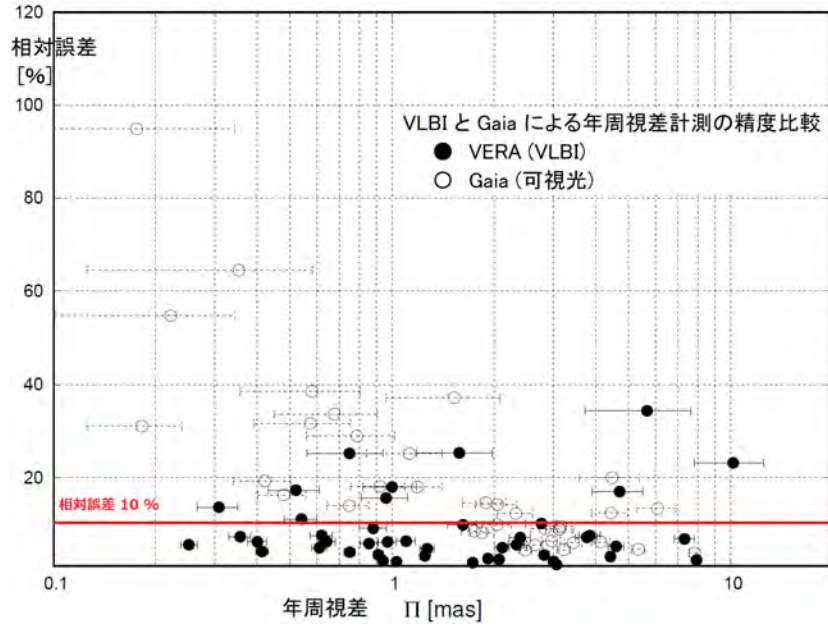


図 2.3: 年周視差と相対誤差。VLBI は年周視差 (すなわち距離) によらず相対誤差 (年周視差の誤差/年周視差) が数%とほぼ一定になっている。一方、Gaia では遠い天体ほど相対誤差が大きくなっている。遠いほど VLBI が有利である。

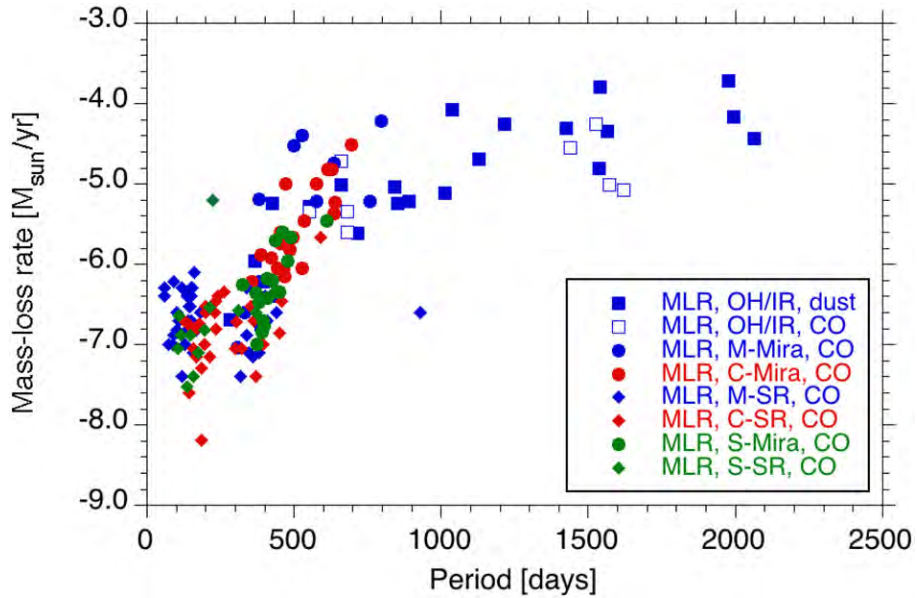


図 2.4: CO 輝線観測から見積もられた質量放出率と変光周期の関係 (44)。O-タイプ、S-タイプ、C-タイプの星周縁が青、緑、赤に対応。SR 型変光星、Mira 型変光星、OH/IR 星がダイヤモンド、丸、四角に対応する。

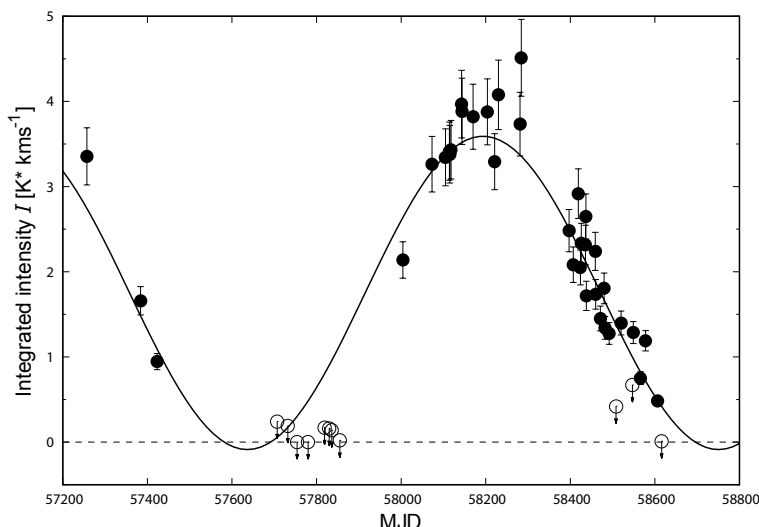


図 2.5: Extreme-OH/IR 星 NSV17351 の H₂O メーザー積分強度の変化。三角関数フィッティングにより変光周期 1114 ± 15 日 (約 3.05 年) が得られた。

緑の物理状態及び質量放出率との相関を調べ、質量放出現象の幅広い理解を目指す。Post-AGB 期から pre-PN 期における星の進化を、人間の寿命以内の短い時間分解能でリアルタイムに観察できるインパクトも大きい。

2.3.3 広い周期範囲 (300–2000 日) と複数系列における脈動変光の周期光度関係の統一的理解

AGB 星はしばしば長周期変光星としても認識されるが、星の進化や質量放出現象と変光周期の間には関連があり、その理解の為に用いられる関係として、周期光度関係 (変光周期と光度またはある波長帯での絶対等級の関連性) が良く知られている。我々はこれまで、天の川銀河内の典型的な Mira 型変光星に対する周期光度関係を VERA を用いて調べてきた (74)。この研究で確認された天の川銀河での周期光度関係がカバーする変光周期は主に 200-400 日ほどの範囲である。

近年我々はダスト過多で変光周期が非常に長い AGB 星を観測対象とするようになったが、その研究の中から、周期 1000 日を超える領域において中間赤外線 ($11.6 \mu\text{m}$) の絶対等級と変光周期の間に相関がある可能性が示唆された。これは中質量星の脈動現象を理解する第 1 歩でもあり、更に観測点を増やしてこの関係を精密化すること重要である。星の質量と変光周期やその変光モードの関係性について、小質量星から中質量星までの幅広い範囲で統一的なモデルの提供が期待できる。

またこの周期光度関係は非常に長い変光周期を持つ AGB 星に対する距離尺度を新たに確立することにつながる。既存のダスト過多な OH/IR 星に対する距離推定法はまだ誤差が大きく、例えば OH メーザーの時間変動を利用した Phase-lag 法では誤差は 10 - 20% であり、銀河回転 (Flat Rotation) を仮定した運動学的な距離推定法でも同程度の誤差がある。我々はまだ成功例が少ない 43GHz での位置天文 VLBI 観測による年周視差測定に長周期 AGB 星ですでに成功させており、この新たな周期光度関係を研究期間の始めの 3 年間で確立して、多数の中質量 AGB 星の天の川銀河における分布の把握につなげる。本課題はまた、Gaia による観測が本質的に困難であるダスト過多な AGB 星に対する VLBI 観測の強みを生かすものであり、他波長の位置天文計画との相補性を持つことも述べておく。

2.3.4 $10^7 - 10^9 \text{ yr}$ 程度の寿命を持つ星々の銀河系内分布と出生地点推定に基づく、終焉星による物質拡散の定量的理解と銀河系構造形成史の解明

銀河はどのように進化して今日の姿を示すのだろうか。AGB 星をプローブとして、その銀河内空間分布や運動、進化段階や質量放出による星間空間への物質還元などを、銀河の構造部位と関連づけて理解する事により、銀河の構造形成史へと迫りたいと考えている。巨視的視点から考えると、宇宙論的構造形成の数値シミュレーションでは 2000 年代に入り超新星爆発や AGB 星による熱力学フィードバックや重元素供給はモデル化されている (99)。つまり AGB 星による質量放出は少なくともモデル化できる程度に大まかには理解されていると考えてもよい。しかしこれは一つ一つの銀河についてみると、銀河全体で積分した効果を見ているに過ぎない。現在の銀河系の構造形成史や星形成史の研究においては、銀河の構造部位、即ちバルジ/ディスク/アーム

などの銀河の構造部位に着目し、それぞれの部位と星の進化や物質還元を関連付けて理解することが必要である。更に中心核近傍の 100 パーセクスケールの構造である中心核バルジや中心核ディスクなどについては今後の赤外線位置天文衛星である小型 JASMINE がその形成史の解明を目指す、それに先立って VLBI による強みを生かした観測からも迫ることが出来る。

長周期変光星の変光周期と初期質量の間には関係があるとされ、変光周期 1000 日の星の質量はおよそ 4 太陽質量程度に制限できるとされる (25)。星の初期質量と年齢にもまた関連性があるため、変光周期の決定は星の年齢の決定へともつながる。様々な年齢の AGB 星について、その分布と運動を知ることは銀河系の構造形成史を知るうえで重要になってくる。まさに銀河考古学と呼ばれる分野である。

中質量で非常に長い変光周期を示す AGB 星は厚いダストやガスに埋もれ、それらによる吸収の為に可視光で暗く、赤外線超過が認められるのは前述した通りである。時には赤外線でも非常に暗くなることもある。またこうした星はその年齢から、薄い円盤 (Thin disk) に属し、銀河面に非常に近い位置に分布することも特徴である。したがって銀河系円盤に漂うダストやガスによる視線方向の吸収を受けるため、より一層観測は困難となる。その結果、距離の推定が難しく、こうした星々の天の川銀河内の広域分布は十分に把握されていない。VLBI 位置天文による年周視差を用いた直接的な距離計測と、広い周期範囲で適用可能な新たな周期光度関係から、こうした星々の空間位置の把握を進める。図 2.6 はダスト過多な AGB 星 NSV17351 の観測結果である。VERA による年周視差計測から天の川銀河における 3 次元位置を決定することが出来た。こうした精密な観測事実を積み重ねることで、天の川銀河の構造形成史やダスト生成の遍歴の理解を深めてゆきたい。

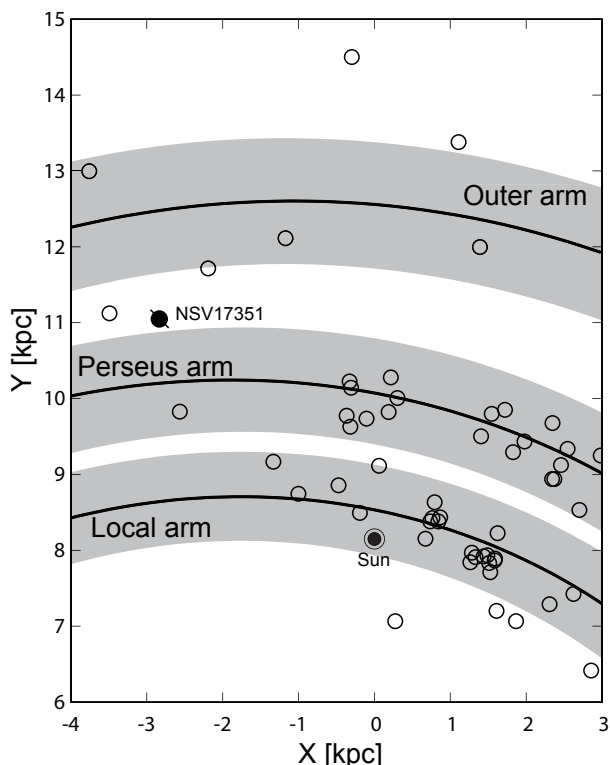


図 2.6: Enlarged face-on view of the Milky Way. The Galactic center is at (0, 0) kpc and the Sun is indicated with the symbol of the Sun (☉) at (0, 8.15) kpc. The filled circle with an error bar indicates the position of NSV17351. Open circles indicate maser sources which have Galactocentric distances of > 7 kpc (80). Three spiral arms are indicated with their widths.

上述のように、多くの研究課題が設定できるが、その達成手段としては共通することも多く、その具体的な作業項目はおよそ下記のように集約することができる。

- $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}$ ($J = 1 \rightarrow 0, 2 \rightarrow 1$) メーザー源の天球面上位置測量と撮像を兼ねた VLBI モニター観測を通し、メーザー源の星周における分布と運動や強度について各進化段階における特徴及びその時間的推移を把握する

- AGB 期の中でも更に詳細な進化段階や種類（典型的 Mira 型変光星、セミレギュラー型変光星、OH/IR 星、非変光 OH/IR 星、赤色超巨星などを想定）に分類できる天体を選定する
- 上記段階ごとに選定された AGB 星の脈動変光について、その変光周期や変光位相に応じたメーザー源分布の依存性を調べる
- 太陽系近傍で局所腕の内外にあり、上記の各段階に分類される合計約 20 天体の AGB 星に対して、VLBI による年周視差と固有運動を計測する
- 単一鏡による H₂O/SiO/OH メーザー源の強度および視線速度のモニター観測
- 単一鏡観測は、H₂O メーザーについては VERA 入来局と岐阜大学 11m 鏡、SiO メーザーについては VERA 入来局、OH メーザーについては白田 64m 鏡を活用する
- 変光周期と中間赤外線での絶対等級推定値から、ダスト過多な OH/IR 星などの長い周期の変光星にも適用可能な新たな周期光度関係を構築する
- 赤外線測光との連携による変光周期や見かけ平均等級などの決定、また変光の様子に基づいた振動モードの分類
- メーザーの種類によらず位置天文 VLBI の観測頻度は典型的に 1 か月間隔であり、1 天体の年周視差決定に要する期間はおよそ 1.5yr である
- 星周 SiO メーザーの天球面上の位置変化を動画として捉えるための VLBI 観測においてはその間隔を 2-3 週間とする
- 代表的な数天体では、星周の SiO メーザー ($v=1,2,3$ $J=1 \rightarrow 0$, $v=1$ $J=2 \rightarrow 1$, $J=3 \rightarrow 2$) の変光周期 2-3 サイクルにわたる天球面上の位置比較を実施する
- 上記の高頻度モニター観測の総時間は 6 hr × 18 回 × 20 星に高頻度モニターによる増分の 1.5 を乗じた 3,240 hr とする
- 銀河系中心から約 200 pc 以内の天の川銀河中心核ディスクおよび中心核バルジに属する約 30 星の AGB 星を選定し、その固有運動を計測する
- 銀河中心近傍の各星に対しては、3 か月間隔で 2 年間程かけて運動を追跡し、観測総時間は 5 hr × 8 回 × 30 星 = 1,200 hr とする
- 次世代赤外線位置天文衛星 (JASMINE 計画) と VLBI 観測の共通する観測天体の抽出と相互データ比較
- 将来的には OH メーザー源の 1.6GHz 高感度 VLBI 撮像による星周縁 OH シェル視直径の計測も行う

2.4 日本における VLBI 研究の独自性・優位性と本研究の新規性

2.4.1 私たち国内 VLBI コミュニティの経緯

現在我々は、VERA と JVN に加え KVN や EAVN を含めた国際的な VLBI 観測網を活用した研究を推進している。これらの VLBI アレイでは、星周メーザー源が著しく空間分解されずに観測できる基線長約 2000km 以内に 22GHz および 43GHz 帯で観測できる望遠鏡が 9 台存在する。これは、米欧豪の VLBA/EVN/LBA 観測網にはない特長である。さらに、VLBI 専用の VERA と KaVA を用いた望遠鏡 7 台による高頻度のメーザー源モニター VLBI 観測や年周視差計測が実現している。我々は特に Mira 型星、OH/IR 星、セミレギュラー型星、赤色超巨星などの終焉期の星に対して、年周視差に基づく三角測量距離を決定しつつ、星周物質の分布や 3 次元運動を解明してきた。また現在、著しい星周減光によって周期光度関係が不明瞭である非常に長い周期の OH/IR 星の測量を進めている。これらの星々の中に明るい SiO メーザーを有しているものがあることを発見し、43GHz の位置天文観測で極めて有利な性能を発揮する VERA の 2 ビーム位相補償観測により、世界に先駆けてこれら星々の質量放出を定量的に把握しつつある。加えて、VLBI により星周構造の au スケールで見られる構造を変光周期の 1/20 に対応する時間分解能で 1 変光サイクル以上にわたって捉える試みも、他波長帯観測には無い特徴である。

2.4.2 国内天文分野における他波長観測、理論などの経験

国内では終焉期の星を研究対象とする赤外線観測が盛んであり、近赤外線に加え中間から遠赤外の波長帯でも観測装置の開発が進む。鹿児島大学の1m光赤外線望遠鏡観測グループとはすでに長年にわたる協力関係にある。また、東京大学のTAOグループとも議論を開始しており、観測対象となるOH/IR星のリストなどを提供している。2020年度にはTAOグループにおいて、ダストやガスが多く非常に長い周期を持つOH/IR星の中間赤外での変光振幅を初めて決めることなどに貢献している。ダスト過多なAGB星では可視光から遠赤外線までのspectral energy distribution(SED)は重要で、他波長/他機関との連携によるSEDの取得やその時間変化の把握なども重要となる。こうしたデータ取得も視野に入れ、VLBIで測定されるそれら星々の距離や空間運動の情報とを組み合わせ、星周物質の大量放出と拡散の仕組みの解明を目指す。

更には、次世代赤外線位置天文衛星計画(JASMINE)に対してもVLBIによる位置天文計測は先駆的な役割を果たす。まずはJASMINEとVLBIの観測データ間で、測量精度を相互検証に有用なサンプルをいち早く提供することができる。またJASMINEによる研究の重要課題である銀河中心近傍の構造形成史解明においても、Sgr A*から異なる距離にある星々の運動に関するデータを持ち寄り、天の川銀河中心核円盤・バルジの形成に関わる星々の特定を進めることで、早い段階から検証データを提供することで重要な貢献をすることが出来る。こうして前述した銀河系バルジと銀河中心ブラックホールの共進化の解明などに資することになる。

2.4.3 研究活動における新規性

これまで述べてきた研究課題や計画の新規性について箇条書きで整理した。

- 大気ゆらぎのコヒーレント時間が短く、位相補償による位置天文解析が難しい43 GHz帯において系統的なVLBI位置天文観測を行う点(Sgr A*の測量との協働も想定している)
- AGB星の変光周期全般にわたるSiOメーザー($v=1,2,3$ $J=1\rightarrow 0$, $v=1$ $J=2\rightarrow 1$, $J=3\rightarrow 1$)の位置比較および、これによるメーザー励起効率の時間変化に基づいた励起機構モデルの決定
- 既存のVLBI装置では未開である43 GHz帯及び86 GHz帯での系統的なVLBI位置天文観測。この周波数帯では高速天体スイッチングによる位相補償が難しい。Sgr A*測量との協働も含めて、星形成領域測量に引き続いてVERAで本格始動する好機である。
- 数年にわたる系統的なメーザー源モニター観測に基づいて選別されるダスト過多で質量放出率が卓越した長周期OH/IR星に対する測量。1.6 GHz OHメーザー源も新たに測量対象に加える。
- ダスト過多で極めて長い変光周期を持つと期待されるAGB星(特にExtreme-OH/IR星)に対し、H₂OやSiOメーザーを用いて数年にわたる系統的な単一鏡モニター観測を行い、その変光周期の決定を行う点。可視光や赤外などの帯域では実現が困難である。

2.4.4 主要3項目の成功達成基準と要求性能の関係

複数の研究課題の中から、主な3項目について成功基準と時間スケールを示す。

- 第3期中期計画期間(2022年3月まで)では、VERAの2ビームシステムを活かして約10天体の長周期OH/IR星の年周視差を決定することを目標とする。これは第4期中期計画の期間において、中間赤外線帯での周期光度関係を新たに確することにつながる。
- 第3期中期計画期間では2天体、第4期中期計画は数天体の代表的なAGB星に対する星周のH₂O / SiO(43 / 86 GHz)メーザーマップ重ね合わせや動画作成を実現する。
- 第4期中期計画およびそれ以降の期間で、年周視差計測および周期光度関係を用いた決定測距に基づく天の川銀河円盤、中心核バルジ、中心核ディスクに付随するOH/IR星の分布と3次元運動情報を得る。

2.5 研究に必要な性能、開発や整備項目

研究を進めるうえで統計的な分析が可能となる天体数はおよそ20天体と考えている。この数の星に関し、一天体につき1か月間隔で2年間のVLBI観測を実施することがひつようである。ひとつの観測内で複数の目標天体を観測するなど、スケジューリングの工夫を加えたいうで、1天体に対する1回の位置天文VLBI観測所用時間はおよそ4時間と考えてよい。観測設備の保守期間を考慮すると年間の観測回数はおおよそ10回である。よって、必要な年間の総観測時間は $4 \times 10 \times 20 = 800$ 時間ほどとなる。さらに一部の天体に対しては、星周物質の高い時間分解能での動画撮像の為に2-3週間間隔のVLBIモニター観測が必要となる。これらを実現可能な観測所要時間内で完結させるには、VERAには22 GHzと43 GHz帯を同時に観測できる準光学系を常設し、かつVERAの2ビーム位相補償システムの継続使用が要求される。43GHzのSiOメーザーでしか観測

することができない銀河系中心付近にある多数の長周期変光星に対して、高精度な位置天文計測を実現する相対 VLBI 観測を実現するには、VERA の 2 ビームシステムは極めて有効である、このシステムを維持するか、高速での観測天体切り替えが可能な望遠鏡が VERA に加えてさらに 4 台必要となる。また、メーザー天体に対しては両偏波観測を行うことで $\sqrt{2}$ 倍の感度向上、位置参照源に対しては広帯域化による感度向上と共に観測の精度と効率の向上を図る。

VERA に加えて、KVN と野辺山 45m 鏡も組み込んで 86GHz 帯の SiO メーザーによる更に高分解能な VLBI 位置天文も要求される。また FAST や SKA1 などとの連携による 1.6 GHz 帯 OH メーザー源による、より多数の VLBI 位置天文を視野に入れ、これら周波数帯の受信機等の整備も必要となってくる。

2.6 研究計画

これまで述べてきた研究課題とその解決に向けて必要な観測的研究や理論的研究を、短期と中期の 2 つの時間スケールで整理する。

2.6.1 短期的な計画（現在～2022年3月）

現在、我々の研究課題に関して VERA を用いた AGB 星の研究プロジェクトと日本の VERA と韓国の KVN を組み合わせた KaVA アレイによる ESTEMA 計画が進行中であり、約 10 天体の老齢星について 22/43GHz 位置天文観測が進行中である。現在から 2022 年 3 月までのいわゆる第 3 期中期計画の期間を念頭に置いた短期の将来計画では、VERA を用いた 43GHz の 2 ビーム観測の優位性を活かした年周視差計測を数天体について成功させることを目標とする。また、いくつかの種類の AGB 星（典型的 Mira 型変光星、セミレギュラー型変光星、OH/IR 星、赤色超巨星など）それぞれから、代表的な天体を選定して観測し、それらの星の周囲のメーザー位置重ね合わせ観測から励起機構解明の手掛かりを得る。並行して国内の全ての VLBI ネットワークとしての JVN や中国の VLBI 用アンテナも含めた次世代東アジア VLBI アレイ (EAVN) を用いた位置天文 VLBI の実証観測も進める。

大口径で高感度な野辺山 45m 鏡も活用した HINOTORI 計画では、86 GHz SiO メーザー源の VLBI 試験観測にも取り組んでいる。1.6 GHz OH メーザー源についても、臼田 64 m 鏡を用いた単一鏡観測を試行中だが、VERA に搭載された L 帯受信機を使った中国の天馬局及び FAST500m 鏡との VLBI 試験観測の実現に向けて検討を進める。

2.6.2 中長期的な計画（第 4 期中期計画 2022～2027 年度）

2022 年 4 月から 2028 年 3 月までのいわゆる第 4 期中期計画の期間においては、現在の VERA 計画を中心とした研究活動から KaVA や EAVN などの東アジア VLBI アレイ (EAVN) へと連続的に接続してゆく。これまでの研究で実績を積み重ねた位置天文 VLBI 観測のノウハウを次世代 VLBI 観測網でも活かし、位置天文 VLBI 観測による年周視差計測の定常的実施を実現し、AGB 星の質量放出現象の理解を滞りなく進める。この期間内には長周期 OH/IR 星に対する新たな変光星周期光度関係を確立し、広い変光周期や質量の条件下において、星の振動モードや AGB 段階における詳細な進化モデルの統一的理解を試みる。あわせて ESTEMA を継続するうえでの計画も詳細に見直し、これら VLBI 位置天文観測との連携を確立する。

また、この期間に確立を目指す新たな周期光度関係によって、短い周期から非常に長い周期までの多数の AGB 星において、銀河系内での空間分布を得て、渦状腕、中心核バルジ、中心核ディスクなどの銀河系の各構造部位と AGB 星の関係を理解する。TAO による中間赤外領域での分光やモニター観測との比較から脈動周期と星周物理状態の時間的対応の理解も目的とする。さらに、野辺山 45m 鏡や EAVN 局との 86 GHz 及び 1.6 GHz 帯 VLBI 観測の継続的実施を実現し、それぞれ ngVLA や SKA-VLBI を用いた量産的なメーザー源測量と星周物質の動画の合成実現への道筋を付ける。

References

- [1]
- [2] Z. Abraham, N. L. Cohen, R. Opher, J. C. Raffaelli, and S. H. Zisk. The giant outburst of the 8 km/s water maser feature in Orion. , Vol. 100, No. 2, pp. L10–L13, July 1981.
- [3] A. Afflerbach, E. Churchwell, J. M. Acord, P. Hofner, S. Kurtz, and C. G. Depree. Galactic Temperature and Metallicity Gradients from Ultracompact H II Regions. , Vol. 106, p. 423, October 1996.
- [4] M. Audard, P. Ábrahám, M. M. Dunham, J. D. Green, N. Grosso, K. Hamaguchi, J. H. Kastner, Á. Kóspál, G. Lodato, M. M. Romanova, S. L. Skinner, E. I. Vorobyov, and Z. Zhu. Episodic Accretion in Young Stars. In Henrik Beuther, Ralf S. Klessen, Cornelis P. Dullemond, and Thomas Henning, editors, *Protostars and Planets VI*, p. 387, January 2014.
- [5] H. Beuther, Th. Henning, H. Linz, S. Feng, S. E. Ragan, R. J. Smith, S. Bihr, T. Sakai, and R. Kuiper. Hierarchical fragmentation and collapse signatures in a high-mass starless region. , Vol. 581, p. A119, September 2015.
- [6] H. Beuther, J. C. Mottram, A. Ahmadi, F. Bosco, H. Linz, Th. Henning, P. Klaassen, J. M. Winters, L. T. Maud, R. Kuiper, D. Semenov, C. Gieser, T. Peters, J. S. Urquhart, R. Pudritz, S. E. Ragan, S. Feng, E. Keto, S. Leurini, R. Cesaroni, M. Beltran, A. Palau, Á. Sánchez-Monge, R. Galvan-Madrid, Q. Zhang, P. Schilke, F. Wyrowski, K. G. Johnston, S. N. Longmore, S. Lumsden, M. Hoare, K. M. Menten, and T. Csengeri. Fragmentation and disk formation during high-mass star formation. IRAM NOEMA (Northern Extended Millimeter Array) large program CORE. , Vol. 617, p. A100, September 2018.
- [7] H. Beuther, A. J. Walsh, K. G. Johnston, Th. Henning, R. Kuiper, S. N. Longmore, and C. M. Walmsley. Fragmentation and disk formation in high-mass star formation: The ALMA view of G351.77-0.54 at 0.06" resolution. , Vol. 603, p. A10, June 2017.
- [8] H. Beuther, Y. Wang, J. Soler, H. Linz, J. Henshaw, E. Vazquez-Semadeni, G. Gomez, S. Ragan, Th. Henning, S. C. O. Glover, M. Y. Lee, and R. Güsten. Dynamical cloud formation traced by atomic and molecular gas. , Vol. 638, p. A44, June 2020.
- [9] D. A. Boboltz, John H. Simonetti, Brian Dennison, P. J. Diamond, and J. A. Uphoff. A Water Maser Flare in W49N: Amplification by a Rotating Foreground Cloud. , Vol. 509, No. 1, pp. 256–261, December 1998.
- [10] I. A. Bonnell, M. R. Bate, C. J. Clarke, and J. E. Pringle. Competitive accretion in embedded stellar clusters. , Vol. 323, No. 4, pp. 785–794, May 2001.
- [11] S. L. Breen, A. M. Sobolev, J. F. Kaczmarek, S. P. Ellingsen, T. P. McCarthy, and M. A. Voronkov. Discovery of Six New Class II Methanol Maser Transitions, Including the Unambiguous Detection of Three Torsionally Excited Lines toward G 358.931-0.030. , Vol. 876, No. 2, p. L25, May 2019.
- [12] C. L. Brogan, T. R. Hunter, C. J. Cyganowski, J. O. Chibueze, R. K. Friesen, T. Hirota, G. C. MacLeod, B. A. McGuire, and A. M. Sobolev. The Extraordinary Outburst in the Massive Protostellar System NGC 6334I-MM1: Flaring of the Water Masers in a North-South Bipolar Outflow Driven by MM1B. , Vol. 866, No. 2, p. 87, October 2018.
- [13] C. L. Brogan, T. R. Hunter, A. P. M. Towner, B. A. McGuire, G. C. MacLeod, M. A. Gurwell, C. J. Cyganowski, J. Brand, R. A. Burns, A. Caratti o Garatti, X. Chen, J. O. Chibueze, N. Hirano, T. Hirota, K. T. Kim, B. H. Kramer, H. Linz, K. M. Menten, A. Remijan, A. Sanna, A. M. Sobolev, T. K. Sridharan, B. Stecklum, K. Sugiyama, G. Surcis, J. Van der Walt, A. E. Volvach, and L. N. Volvach. Sub-arcsecond (Sub)millimeter Imaging of the Massive Protocluster G358.93-0.03: Discovery of 14 New Methanol Maser Lines Associated with a Hot Core. , Vol. 881, No. 2, p. L39, August 2019.

- [14] R. A. Burns, G. Orosz, O. Bayandina, G. Surcis, M. Olech, G. MacLeod, A. Volvach, G. Rudnitskii, T. Hirota, K. Immer, J. Blanchard, B. Marcote, H. J. van Langevelde, J. O. Chibueze, K. Sugiyama, Kee-Tae Kim, I. Val'tts, N. Shakhvorostova, B. Kramer, W. A. Baan, C. Brogan, T. Hunter, S. Kurtz, A. M. Sobolev, J. Brand, and L. Volvach. VLBI observations of the G25.65+1.05 water maser superburst. , Vol. 491, No. 3, pp. 4069–4075, January 2020.
- [15] R. A. Burns, K. Sugiyama, T. Hirota, Kee-Tae Kim, A. M. Sobolev, B. Stecklum, G. C. MacLeod, Y. Yonekura, M. Olech, G. Orosz, S. P. Ellingsen, L. Hyland, A. Caratti o Garatti, C. Brogan, T. R. Hunter, C. Phillips, S. P. van den Heever, J. Eislöffel, H. Linz, G. Surcis, J. O. Chibueze, W. Baan, and B. Kramer. A heatwave of accretion energy traced by masers in the G358-MM1 high-mass protostar. *Nature Astronomy*, Vol. 4, pp. 506–510, January 2020.
- [16] A. Caratti o Garatti, B. Stecklum, R. Garcia Lopez, J. Eislöffel, T. P. Ray, A. Sanna, R. Cesaroni, C. M. Walmsley, R. D. Oudmaijer, W. J. de Wit, L. Moscadelli, J. Greiner, A. Krabbe, C. Fischer, R. Klein, and J. M. Ibañez. Disk-mediated accretion burst in a high-mass young stellar object. *Nature Physics*, Vol. 13, No. 3, pp. 276–279, March 2017.
- [17] R. Cesaroni, L. Moscadelli, R. Neri, A. Sanna, A. Caratti o Garatti, J. Eisloffel, B. Stecklum, T. Ray, and C. M. Walmsley. Radio outburst from a massive (proto)star. When accretion turns into ejection. , Vol. 612, p. A103, May 2018.
- [18] Xi Chen, Andrej M. Sobolev, Shari L. Breen, Zhi-Qiang Shen, Simon P. Ellingsen, Gordon C. MacLeod, Bin Li, Maxim A. Voronkov, Jane F. Kaczmarek, Jiangshui Zhang, Zhi-Yuan Ren, Jin Wang, Hendrik Linz, Todd R. Hunter, Crystal Brogan, Koichiro Sugiyama, Ross A. Burns, Karl Menten, Alberto Sanna, Bringfried Stecklum, Tomoya Hirota, Kee-Tae Kim, James Chibueze, and SP van den Heever. $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ Masers Associated With a Transient Phenomenon in a High-mass Young Stellar Object. , Vol. 890, No. 2, p. L22, February 2020.
- [19] A. Chiavassa, B. Freytag, and M. Schultheis. Heading Gaia to measure atmospheric dynamics in AGB stars. , Vol. 617, p. L1, September 2018.
- [20] James O. Chibueze, Gordon C. MacLeod, Jakobus M. Vorster, Tomoya Hirota, Crystal L. Brogan, Todd R. Hunter, and Ruby van Rooyen. The Extraordinary Outburst in the Massive Protostellar System NGC 6334 I-MM1: Spatiokinematics of Water Masers during a Contemporaneous Flare Event. , Vol. 908, No. 2, p. 175, February 2021.
- [21] Ed Churchwell. Ultra-Compact HII Regions and Massive Star Formation. , Vol. 40, pp. 27–62, January 2002.
- [22] D. M. Cragg, A. M. Sobolev, and P. D. Godfrey. Models of class II methanol masers based on improved molecular data. , Vol. 360, No. 2, pp. 533–545, June 2005.
- [23] S. Curiel, P. T. P. Ho, N. A. Patel, J. M. Torrelles, L. F. Rodríguez, M. A. Trinidad, J. Cantó, L. Hernández, J. F. Gómez, G. Garay, and G. Anglada. Large Proper Motions in the Jet of the High-Mass YSO Cepheus A HW2. , Vol. 638, No. 2, pp. 878–886, February 2006.
- [24] Shuji Deguchi and William D. Watson. Interacting Masers and the Extreme Brightness of Astrophysical Water Masers. , Vol. 340, p. L17, May 1989.
- [25] M. W. Feast. The Ages, Masses, Evolution and Kinematics of Mira Variables. In Toshiya Ueta, Noriyuki Matsunaga, and Yoshifusa Ita, editors, *AGB Stars and Related Phenomena*, p. 48, January 2009.
- [26] Siyi Feng, Henrik Beuther, Qizhou Zhang, Hauyu Baobab Liu, Zhiyu Zhang, Ke Wang, and Keping Qiu. Outflow Detection in a 70 μm Dark High-Mass Core. , Vol. 828, No. 2, p. 100, September 2016.
- [27] B. Freytag, S. Liljegren, and S. Höfner. Global 3D radiation-hydrodynamics models of AGB stars. Effects of convection and radial pulsations on atmospheric structures. , Vol. 600, p. A137, April 2017.

- [28] Kenta Fujisawa, Nozomu Aoki, Yoshito Nagadomi, Saki Kimura, Tadashi Shimomura, Genta Takase, Koichiro Sugiyama, Kazuhito Motogi, Kotaro Niinuma, Tomoya Hirota, and Yoshinori Yonekura. Observations of the bursting activity of the 6.7 GHz methanol maser in G33.641-0.228. , Vol. 66, No. 6, p. 109, December 2014.
- [29] Kenta Fujisawa, Koichiro Sugiyama, Kazuhito Motogi, Kazuya Hachisuka, Yoshinori Yonekura, Satoko Sawada-Satoh, Naoko Matsumoto, Kazuo Sorai, Munetake Momose, Yu Saito, Hiroshi Takaba, Hideo Ogawa, Kimihiro Kimura, Kotaro Niinuma, Daiki Hirano, Toshihiro Omodaka, Hideyuki Kobayashi, Noriyuki Kawaguchi, Katsunori M. Shibata, Mareki Honma, Tomoya Hirota, Yasuhiro Murata, Akihiro Doi, Nanako Mochizuki, Zhiqiang Shen, Xi Chen, Bo Xia, Bin Li, and Kee-Tae Kim. Observations of 6.7 GHz methanol masers with East-Asian VLBI Network. I. VLBI images of the first epoch of observations. , Vol. 66, No. 2, p. 31, April 2014.
- [30] Kenta Fujisawa, Yoshinori Yonekura, Koichiro Sugiyama, Hikari Horiuchi, Takehiro Hayashi, Kazuya Hachisuka, Naoko Matsumoto, and Kotaro Niinuma. A flare of methanol maser in S255. The Astronomer's Telegram, Vol. 8286, p. 1, November 2015.
- [31] Guido Garay, J. M. Moran, and A. D. Haschick. The Orion-KL Super Water Maser. , Vol. 338, p. 244, March 1989.
- [32] S. Goedhart, M. J. Gaylard, and D. J. van der Walt. Periodic flares in the methanol maser source G9.62+0.20E. , Vol. 339, No. 4, pp. L33–L36, March 2003.
- [33] S. Goedhart, M. C. Langa, M. J. Gaylard, and D. J. Van Der Walt. Short-period variability in the Class II methanol maser source G12.89+0.49 (IRAS 18089-1732). , Vol. 398, No. 2, pp. 995–1010, September 2009.
- [34] S. Goedhart, J. P. Maswanganye, M. J. Gaylard, and D. J. van der Walt. Periodicity in Class II methanol masers in high-mass star-forming regions. , Vol. 437, No. 2, pp. 1808–1820, January 2014.
- [35] M. D. Gray, J. Baggott, J. Westlake, and S. Etoaka. Maser flare simulations from oblate and prolate clouds. , Vol. 486, No. 3, pp. 4216–4225, July 2019.
- [36] M. D. Gray, S. Etoaka, A. Travis, and B. Pimpanuwat. Maser flares driven by variations in pumping and background radiation. , Vol. 493, No. 2, pp. 2472–2489, April 2020.
- [37] L. Haemmerlé, P. Eggenberger, G. Meynet, A. Maeder, and C. Charbonnel. Massive star formation by accretion. I. Disc accretion. , Vol. 585, p. A65, January 2016.
- [38] Tomoya Hirota, Riccardo Cesaroni, Luca Moscadelli, Koichiro Sugiyama, Ross A. Burns, Jungha Kim, Kazuyoshi Sunada, and Yoshinori Yonekura. Water maser variability in a high-mass YSO outburst. VERA and ALMA observations of S255 NIRS 3. , Vol. 647, p. A23, March 2021.
- [39] Tomoya Hirota, Masahiro N. Machida, Yuko Matsushita, Kazuhito Motogi, Naoko Matsumoto, Mi Kyoung Kim, Ross A. Burns, and Mareki Honma. Disk-driven rotating bipolar outflow in Orion Source I. Nature Astronomy, Vol. 1, p. 0146, July 2017.
- [40] Tomoya Hirota, Masato Tsuboi, Kenta Fujisawa, Mareki Honma, Noriyuki Kawaguchi, Mi Kyoung Kim, Hideyuki Kobayashi, Hiroshi Imai, Toshihiro Omodaka, Katsunori M. Shibata, Tomomi Shi-moikura, and Yoshinori Yonekura. Identification of Bursting Water Maser Features in Orion KL. , Vol. 739, No. 2, p. L59, October 2011.
- [41] Tomoya Hirota, Masato Tsuboi, Yasutaka Kurono, Kenta Fujisawa, Mareki Honma, Mi Kyoung Kim, Hiroshi Imai, and Yoshinori Yonekura. VERA and ALMA observations of the H₂O supermaser burst in Orion KL. , Vol. 66, No. 6, p. 106, December 2014.
- [42] M. G. Hoare, S. E. Kurtz, S. Lizano, E. Keto, and P. Hofner. Ultracompact Hii Regions and the Early Lives of Massive Stars. In Bo Reipurth, David Jewitt, and Klaus Keil, editors, Protostars and Planets V, p. 181, January 2007.

- [43] M. G. Hoare, C. R. Purcell, E. B. Churchwell, P. Diamond, W. D. Cotton, C. J. Chandler, S. Smethurst, S. E. Kurtz, L. G. Mundy, S. M. Dougherty, R. P. Fender, G. A. Fuller, J. M. Jackson, S. T. Garrington, T. R. Gledhill, P. F. Goldsmith, S. L. Lumsden, J. Martí, T. J. T. Moore, T. W. B. Muxlow, R. D. Oudmaijer, J. D. Pandian, J. M. Paredes, D. S. Shepherd, R. E. Spencer, M. A. Thompson, G. Umana, J. S. Urquhart, and A. A. Zijlstra. The Coordinated Radio and Infrared Survey for High-Mass Star Formation (The CORNISH Survey). I. Survey Design. , Vol. 124, No. 919, p. 939, September 2012.
- [44] Susanne Höfner and Hans Olofsson. Mass loss of stars on the asymptotic giant branch. Mechanisms, models and measurements. , Vol. 26, No. 1, p. 1, January 2018.
- [45] Mareki Honma, Kyung Choi Yoon, Takeshi Bushimata, Takahiro Fujii, Tomoya Hirota, Koji Horiai, Hiroshi Imai, Noritomo Inomata, Jose Ishitsuka, Kenzaburo Iwadate, Takaaki Jike, Osamu Kameya, Ryuichi Kamohara, Yukitoshi Kan-Ya, Noriyuki Kawaguchi, Hideyuki Kobayashi, Seisuke Kuji, Tomoharu Kurayama, Seiji Manabe, Takeshi Miyaji, Akiharu Nakagawa, Kouichirou Nakashima, Riiko Nagayoshi, Toshihiro Omodaka, Tomoaki Oyama, Maria Rioja, Satoshi Sakai, Sei-Ichiro Sakakibara, Katsuhisa Sato, Tetsuo Sasao, M. Katsunori Shibata, Rie Shimizu, Kasumi Sora, Hiroshi Suda, Yoshiaki Tamura, and Kazuyoshi Yamashita. VERA Observation of the W49N H₂O Maser Outburst in 2003 October. , Vol. 56, pp. L15–L18, June 2004.
- [46] Takashi Hosokawa, Shingo Hirano, Rolf Kuiper, Harold W. Yorke, Kazuyuki Omukai, and Naoki Yoshida. Formation of Massive Primordial Stars: Intermittent UV Feedback with Episodic Mass Accretion. , Vol. 824, No. 2, p. 119, June 2016.
- [47] Takashi Hosokawa and Kazuyuki Omukai. Evolution of Massive Protostars with High Accretion Rates. , Vol. 691, No. 1, pp. 823–846, January 2009.
- [48] Takashi Hosokawa, Harold W. Yorke, and Kazuyuki Omukai. Evolution of Massive Protostars Via Disk Accretion. , Vol. 721, No. 1, pp. 478–492, September 2010.
- [49] T. R. Hunter, C. L. Brogan, G. C. MacLeod, C. J. Cyganowski, J. O. Chibueze, R. Friesen, T. Hirota, D. P. Smits, C. J. Chandler, and R. Indebetouw. The Extraordinary Outburst in the Massive Protostellar System NGC 6334I-MM1: Emergence of Strong 6.7 GHz Methanol Masers. , Vol. 854, No. 2, p. 170, February 2018.
- [50] T. R. Hunter, C. L. Brogan, G. MacLeod, C. J. Cyganowski, C. J. Chandler, J. O. Chibueze, R. Friesen, R. Indebetouw, C. Thesner, and K. H. Young. An Extraordinary Outburst in the Massive Protostellar System NGC6334I-MM1: Quadrupling of the Millimeter Continuum. , Vol. 837, No. 2, p. L29, March 2017.
- [51] Jr. Iben, Icko. Stellar Evolution Within and off the Main Sequence. , Vol. 5, p. 571, January 1967.
- [52] Hiroshi Imai, Akiharu Nakagawa, and Hiroshi Takaba. Overall variation of the H₂O masers around W Hydrae in 28 years. , Vol. 71, No. 6, p. 120, December 2019.
- [53] Kohei Inayoshi, Koichiro Sugiyama, Takashi Hosokawa, Kazuhito Motogi, and Kei E. I. Tanaka. Direct Diagnostics of Forming Massive Stars: Stellar Pulsation and Periodic Variability of Maser Sources. , Vol. 769, No. 2, p. L20, June 2013.
- [54] Tsuyoshi Inoue, Patrick Hennebelle, Yasuo Fukui, Tomoaki Matsumoto, Kazunari Iwasaki, and Shuichiro Inutsuka. The formation of massive molecular filaments and massive stars triggered by a magnetohydrodynamic shock wave. , Vol. 70, p. S53, May 2018.
- [55] R. Kamohara, V. Bujarrabal, M. Honma, A. Nakagawa, N. Matsumoto, T. Oyama, T. Hirota, H. Imai, K. M. Shibata, H. Kobayashi, K. Sato, and Y. Ueno. VERA observations of SiO maser emission from R Aquarii. , Vol. 510, p. A69, February 2010.
- [56] M. S. N. Kumar, P. Palmeirim, D. Arzoumanian, and S. I. Inutsuka. Unifying low- and high-mass star formation through density-amplified hubs of filaments. The highest mass stars ($\gtrsim 100 M_{\odot}$) form only in hubs. , Vol. 642, p. A87, October 2020.

- [57] Charles J. Lada and Elizabeth A. Lada. Embedded Clusters in Molecular Clouds. , Vol. 41, pp. 57–115, January 2003.
- [58] Sheng-Yuan Liu, Yu-Nung Su, Igor Zinchenko, Kuo-Song Wang, and Yuan Wang. A Submillimeter Burst of S255IR SMA1: The Rise and Fall of Its Luminosity. , Vol. 863, No. 1, p. L12, August 2018.
- [59] S. L. Lumsden, M. G. Hoare, J. S. Urquhart, R. D. Oudmaijer, B. Davies, J. C. Mottram, H. D. B. Cooper, and T. J. T. Moore. The Red MSX Source Survey: The Massive Young Stellar Population of Our Galaxy. , Vol. 208, No. 1, p. 11, September 2013.
- [60] Masahiro N. Machida. Protostellar Jets Enclosed by Low-velocity Outflows. , Vol. 796, No. 1, p. L17, November 2014.
- [61] Masahiro N. Machida and Shantanu Basu. The First Two Thousand Years of Star Formation. , Vol. 876, No. 2, p. 149, May 2019.
- [62] Masahiro N. Machida and Takashi Hosokawa. Failed and delayed protostellar outflows with high mass accretion rates. , October 2020.
- [63] Masahiro N. Machida and Takashi Hosokawa. Failed and delayed protostellar outflows with high-mass accretion rates. , Vol. 499, No. 3, pp. 4490–4514, December 2020.
- [64] G. C. MacLeod, D. P. Smits, S. Goedhart, T. R. Hunter, C. L. Brogan, J. O. Chibueze, S. P. van den Heever, C. J. Thesner, P. J. Banda, and J. D. Paulsen. A masing event in NGC 6334I: contemporaneous flaring of hydroxyl, methanol, and water masers. , Vol. 478, No. 1, pp. 1077–1092, July 2018.
- [65] G. C. MacLeod, K. Sugiyama, T. R. Hunter, J. Quick, W. Baan, S. L. Breen, C. L. Brogan, R. A. Burns, A. Caratti o Garatti, X. Chen, J. O. Chibueze, M. Houde, J. F. Kaczmarek, H. Linz, F. Rajabi, Y. Saito, S. Schmidl, A. M. Sobolev, B. Stecklum, S. P. van den Heever, and Y. Yonekura. Detection of new methanol maser transitions associated with G358.93-0.03. , Vol. 489, No. 3, pp. 3981–3989, November 2019.
- [66] Yuko Matsushita, Masahiro N. Machida, Yuya Sakurai, and Takashi Hosokawa. Massive outflows driven by magnetic effects in star-forming clouds with high mass accretion rates. , Vol. 470, No. 1, pp. 1026–1049, September 2017.
- [67] Christopher F. McKee and Jonathan C. Tan. The Formation of Massive Stars from Turbulent Cores. , Vol. 585, No. 2, pp. 850–871, March 2003.
- [68] D. M. A. Meyer, E. I. Vorobyov, V. G. Elbakyan, B. Stecklum, J. Eislöffel, and A. M. Sobolev. Burst occurrence in young massive stellar objects. , Vol. 482, No. 4, pp. 5459–5476, February 2019.
- [69] D. M. A. Meyer, E. I. Vorobyov, R. Kuiper, and W. Kley. On the existence of accretion-driven bursts in massive star formation. , Vol. 464, No. 1, pp. L90–L94, January 2017.
- [70] Cheulhong Min, Naoko Matsumoto, Mi Kyoung Kim, Tomoya Hirota, Katsunori M. Shibata, Se-Hyung Cho, Makoto Shizugami, and Mareki Honma. Accurate parallax measurement toward the symbiotic star R Aquarii. , Vol. 66, No. 2, p. 38, April 2014.
- [71] L. Moscadelli, A. Sanna, C. Goddi, M. C. Walmsley, R. Cesaroni, A. Caratti o Garatti, B. Stecklum, K. M. Menten, and A. Kraus. Extended CH₃OH maser flare excited by a bursting massive YSO. , Vol. 600, p. L8, April 2017.
- [72] Kazuhito Motogi, Tomoya Hirota, Masahiro N. Machida, Yoshinori Yonekura, Mareki Honma, Shigehisa Takakuwa, and Satoki Matsushita. The First Bird’s-eye View of a Gravitationally Unstable Accretion Disk in High-mass Star Formation. , Vol. 877, No. 2, p. L25, June 2019.
- [73] Kazuhito Motogi, Kazuo Sorai, Mareki Honma, Tomoya Hirota, Kazuya Hachisuka, Kotaro Niinuma, Koichiro Sugiyama, Yoshinori Yonekura, and Kenta Fujisawa. Accelerating a water maser face-on jet from a high mass young stellar object. , Vol. 68, No. 5, p. 69, October 2016.

- [74] Akiharu Nakagawa, Tomoharu Kurayama, Makoto Matsui, Toshihiro Omodaka, Mareki Honma, Katsunori M. Shibata, Katsuhisa Sato, and Takaaki Jike. Parallax of a Mira variable R Ursae Majoris studied with astrometric VLBI. , Vol. 68, No. 5, p. 78, October 2016.
- [75] Akiharu Nakagawa, Tomoharu Kurayama, Gabor Orosz, Tomoaki Oyama, Takumi Nagayama, and Toshihiro Omodaka. Astrometric observation of the Galactic LPVs with VERA; Mira and OH/IR stars. *IAU Symposium*, Vol. 343, pp. 476–477, December 2019.
- [76] S. Yu. Parfenov and A. M. Sobolev. On the Class II methanol maser periodic variability due to the rotating spiral shocks in the gaps of discs around young binary stars. , Vol. 444, No. 1, pp. 620–628, October 2014.
- [77] N. Peretto, G. A. Fuller, A. Duarte-Cabral, A. Avison, P. Hennebelle, J. E. Pineda, Ph. André, S. Bontemps, F. Motte, N. Schneider, and S. Molinari. Global collapse of molecular clouds as a formation mechanism for the most massive stars. , Vol. 555, p. A112, July 2013.
- [78] Thushara Pillai, Jens Kauffmann, Qizhou Zhang, Patricio Sanhueza, Silvia Leurini, Ke Wang, T. K. Sridharan, and Carsten König. Massive and low-mass protostars in massive “starless” cores. , Vol. 622, p. A54, February 2019.
- [79] C. R. Purcell, M. G. Hoare, W. D. Cotton, S. L. Lumsden, J. S. Urquhart, C. Chandler, E. B. Churchwell, P. Diamond, S. M. Dougherty, R. P. Fender, G. Fuller, S. T. Garrington, T. M. Gledhill, P. F. Goldsmith, L. Hindson, J. M. Jackson, S. E. Kurtz, J. Martí, T. J. T. Moore, L. G. Mundy, T. W. B. Muxlow, R. D. Oudmaijer, J. D. Pandian, J. M. Paredes, D. S. Shepherd, S. Smethurst, R. E. Spencer, M. A. Thompson, G. Umana, and A. A. Zijlstra. The Coordinated Radio and Infrared Survey for High-mass Star Formation. II. Source Catalog. , Vol. 205, No. 1, p. 1, March 2013.
- [80] M. J. Reid, K. M. Menten, A. Brunthaler, X. W. Zheng, T. M. Dame, Y. Xu, J. Li, N. Sakai, Y. Wu, K. Immer, B. Zhang, A. Sanna, L. Moscadelli, K. L. J. Rygl, A. Bartkiewicz, B. Hu, L. H. Quiroga-Nuñez, and H. J. van Langevelde. Trigonometric Parallaxes of High-mass Star-forming Regions: Our View of the Milky Way. , Vol. 885, No. 2, p. 131, November 2019.
- [81] V. Rosero, P. Hofner, M. Claussen, S. Kurtz, R. Cesaroni, E. D. Araya, C. Carrasco-González, L. F. Rodríguez, K. M. Menten, F. Wyrowski, L. Loinard, and S. P. Ellingsen. Weak and Compact Radio Emission in Early High-mass Star-forming Regions. I. VLA Observations. , Vol. 227, No. 2, p. 25, December 2016.
- [82] V. Rosero, P. Hofner, S. Kurtz, R. Cesaroni, C. Carrasco-González, E. D. Araya, L. F. Rodríguez, K. M. Menten, F. Wyrowski, L. Loinard, S. P. Ellingsen, and S. Molinari. Weak and Compact Radio Emission in Early High-mass Star-forming Regions. II. The Nature of the Radio Sources. , Vol. 880, No. 2, p. 99, August 2019.
- [83] Yu Saiki and Masahiro N. Machida. Twin Jets and Close Binary Formation. , Vol. 897, No. 2, p. L22, July 2020.
- [84] Takeshi Sakai, Nami Sakai, Jonathan B. Foster, Patricio Sanhueza, James M. Jackson, Marc Kassis, Kenji Furuya, Yuri Aikawa, Tomoya Hirota, and Satoshi Yamamoto. ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: Hot Core and Molecular Outflows. , Vol. 775, No. 1, p. L31, September 2013.
- [85] Takeshi Sakai, Takahiro Yanagida, Kenji Furuya, Yuri Aikawa, Patricio Sanhueza, Nami Sakai, Tomoya Hirota, James M. Jackson, and Satoshi Yamamoto. ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: Complex Organic and Deuterated Molecules. , Vol. 857, No. 1, p. 35, April 2018.
- [86] Y. Sakurai, E. I. Vorobyov, T. Hosokawa, N. Yoshida, K. Omukai, and H. W. Yorke. Supermassive star formation via episodic accretion: protostellar disc instability and radiative feedback efficiency. , Vol. 459, No. 2, pp. 1137–1145, June 2016.

- [87] A. Sanna, K. M. Menten, C. Carrasco-González, M. J. Reid, S. P. Ellingsen, A. Brunthaler, L. Moscadelli, R. Cesaroni, and V. Krishnan. The Environment of the Strongest Galactic Methanol Maser. , Vol. 804, No. 1, p. L2, May 2015.
- [88] T. Shimoikura, H. Kobayashi, T. Omodaka, P. J. Diamond, L. I. Matveyenko, and K. Fujisawa. VLBA Observations of a Bursting Water Maser in Orion KL. , Vol. 634, No. 1, pp. 459–467, November 2005.
- [89] G. C. Sloan, K. E. Kraemer, P. R. Wood, A. A. Zijlstra, J. Bernard-Salas, D. Devost, and J. R. Houck. The Magellanic Zoo: Mid-Infrared Spitzer Spectroscopy of Evolved Stars and Circumstellar Dust in the Magellanic Clouds. , Vol. 686, No. 2, pp. 1056–1081, October 2008.
- [90] B. Stecklum, V. Wolf, H. Linz, A. Caratti o Garatti, S. Schmidl, S. Klose, J. Eisloffel, Ch. Fischer, C. Brogan, R. A. Burns, O. Bayandina, C. Cyganowski, M. Gurwell, T. Hunter, N. Hirano, K. T. Kim, G. MacLeod, K. M. Menten, M. Olech, G. Orosz, A. Sobolev, T. K. Sridharan, G. Surcis, K. Sugiyama, J. van der Walt, A. Volvach, and Y. Yonekura. Infrared observations of the flaring maser source G358.93-0.03. SOFIA confirms an accretion burst from a massive young stellar object. , Vol. 646, p. A161, February 2021.
- [91] K. Sugiyama, Y. Yonekura, K. Motogi, Y. Saito, M. Momose, M. Honma, T. Hirota, M. Uchiyama, K. E. I. Tanaka, B. H. Kramer, K. Asanok, P. Jaroenjittichai, and K. Fujisawa. Long-term with short-intervals monitor of 6.7 GHz CH₃OH masers using Hitachi 32-m radio telescope to statistically research the periodic flux variability around high-mass protostars. In Journal of Physics Conference Series, Vol. 1380 of Journal of Physics Conference Series, p. 012057, November 2019.
- [92] Koichiro Sugiyama, Katsura Nagase, Yoshinori Yonekura, Munetake Momose, Yasutaka Yasui, Yu Saito, Kazuhito Motogi, Mareki Honma, Kazuya Hachisuka, Naoko Matsumoto, Mizuho Uchiyama, and Kenta Fujisawa. The shortest periodic and flaring flux variability of a methanol maser emission at 6.7 GHz in G 014.23-00.50. , Vol. 69, No. 4, p. 59, August 2017.
- [93] Koichiro Sugiyama, Yu Saito, Yoshinori Yonekura, and Munetake Momose. Bursting activity of the 6.668-GHz CH₃OH maser detected in G 358.93-00.03 using the Hitachi 32-m. The Astronomer’s Telegram, Vol. 12446, p. 1, January 2019.
- [94] Jonathan C. Tan, Shuo Kong, Michael J. Butler, Paola Caselli, and Francesco Fontani. The Dynamics of Massive Starless Cores with ALMA. , Vol. 779, No. 2, p. 96, December 2013.
- [95] Kei E. I. Tanaka, Jonathan C. Tan, Jan E. Staff, and Yichen Zhang. Outflow-confined H II Regions. II. The Early Break-out Phase. , Vol. 849, No. 2, p. 133, November 2017.
- [96] Kei E. I. Tanaka, Jonathan C. Tan, and Yichen Zhang. Outflow-confined HII Regions. I. First Signposts of Massive Star Formation. , Vol. 818, No. 1, p. 52, February 2016.
- [97] Kei E. I. Tanaka, Yichen Zhang, Tomoya Hirota, Nami Sakai, Kazuhito Motogi, Kengo Tomida, Jonathan C. Tan, Viviana Rosero, Aya E. Higuchi, Satoshi Ohashi, Mengyao Liu, and Koichiro Sugiyama. Salt, Hot Water, and Silicon Compounds Tracing Massive Twin Disks. , Vol. 900, No. 1, p. L2, September 2020.
- [98] Kei E. I. Tanaka, Yichen Zhang, and Kazuhito Motogi. The Hot and Dynamic Birth of Massive Stars from the ngVLA Perspective. arXiv e-prints, p. arXiv:2103.08859, March 2021.
- [99] L. Tornatore, S. Borgani, K. Dolag, and F. Matteucci. Chemical enrichment of galaxy clusters from hydrodynamical simulations. , Vol. 382, No. 3, pp. 1050–1072, December 2007.
- [100] Mizuho Uchiyama, Takuya Yamashita, Koichiro Sugiyama, Tatsuya Nakaoka, Miho Kawabata, Ryosuke Itoh, Masayuki Yamanaka, Hiroshi Akitaya, Koji Kawabata, Yoshinori Yonekura, Yu Saito, Kazuhito Motogi, and Kenta Fujisawa. Near-infrared monitoring of the accretion outburst in the massive young stellar object S255-NIRS3. , Vol. 72, No. 1, p. 4, February 2020.
- [101] N. Ukita, N. Kaifu, Y. Chikada, T. Miyaji, and K. Miyazawa. Time Variation of SIO Maser Emissions - Part One - Velocity Structure of the Orion SIO Maser Envelope. , Vol. 33, p. 341, January 1981.

- [102] D. J. van der Walt, S. Goedhart, and M. J. Gaylard. Periodic class II methanol masers in G9.62+0.20E. , Vol. 398, No. 2, pp. 961–970, September 2009.
- [103] VERA Collaboration, Tomoya Hirota, Takumi Nagayama, Mareki Honma, Yuuki Adachi, Ross A. Burns, James O. Chibueze, Yoon Kyung Choi, Kazuya Hachisuka, Kazuhiro Hada, Yoshiaki Hagiwara, Shota Hamada, Toshihiro Handa, Mao Hashimoto, Ken Hirano, Yushi Hirata, Takanori Ichikawa, Hiroshi Imai, Daichi Inenaga, Toshio Ishikawa, Takaaki Jike, Osamu Kameya, Daichi Kaseda, Jeong Sook Kim, Jung-ha Kim, Mi Kyoung Kim, Hideyuki Kobayashi, Yusuke Kono, Tomoharu Kurayama, Masako Matsuno, Atsushi Morita, Kazuhito Motogi, Takeru Murase, Akiharu Nakagawa, Hiroyuki Nakanishi, Kotaro Niinuma, Junya Nishi, Chung Sik Oh, Toshihiro Omodaka, Miyako Oyadomari, Tomoaki Oyama, Daisuke Sakai, Nobuyuki Sakai, Satoko Sawada-Satoh, Katsunori M. Shibata, Makoto Shizugami, Jumpei Sudo, Koichiro Sugiyama, Kazuyoshi Sunada, Syunsaku Suzuki, Ken Takahashi, Yoshiaki Tamura, Fumie Tazaki, Yuji Ueno, Yuri Uno, Riku Urago, Koji Wada, Yuan Wei Wu, Kazuyoshi Yamashita, Yuto Yamashita, Aya Yamauchi, and Akito Yuda. The First VERA Astrometry Catalog. , Vol. 72, No. 4, p. 50, August 2020.
- [104] Peng Wang, Zhi-Yun Li, Tom Abel, and Fumitaka Nakamura. Outflow Feedback Regulated Massive Star Formation in Parsec-Scale Cluster-Forming Clumps. , Vol. 709, No. 1, pp. 27–41, January 2010.
- [105] Yoshinori Yonekura, Yu Saito, Koichiro Sugiyama, Kang Lou Soon, Munetake Momose, Masayoshi Yokosawa, Hideo Ogawa, Kimihiro Kimura, Yasuhiro Abe, Atsushi Nishimura, Yutaka Hasegawa, Kenta Fujisawa, Tomoaki Ohyama, Yusuke Kono, Yusuke Miyamoto, Satoko Sawada-Satoh, Hideyuki Kobayashi, Noriyuki Kawaguchi, Mareki Honma, Katsunori M. Shibata, Katsuhisa Sato, Yuji Ueno, Takaaki Jike, Yoshiaki Tamura, Tomoya Hirota, Atsushi Miyazaki, Kotaro Niinuma, Kazuo Sorai, Hiroshi Takaba, Kazuya Hachisuka, Tetsuro Kondo, Mamoru Sekido, Yasuhiro Murata, Naomasa Nakai, and Toshihiro Omodaka. The Hitachi and Takahagi 32 m radio telescopes: Upgrade of the antennas from satellite communication to radio astronomy. , Vol. 68, No. 5, p. 74, October 2016.
- [106] Yichen Zhang, Jonathan C. Tan, Kei E. I. Tanaka, James M. De Buizer, Mengyao Liu, Maria T. Beltrán, Kaitlin Kratter, Diego Mardones, and Guido Garay. Dynamics of a massive binary at birth. *Nature Astronomy*, Vol. 3, pp. 517–523, March 2019.

補足資料：銀河WG

銀河系構造の基本パラメータと銀河系中心領域の描像の解明

永山匠 (国立天文台)、坂井伸行 (KASI)、酒井大裕 (国立天文台)

2021/02/26

将来計画 WG 銀河班で検討した「銀河系構造の基本パラメータと銀河系中心領域の描像の解明」についてまとめる。銀河定数、中間質量ブラックホール、Central Molecular Zone に関する科学検討、86GHz 帯観測での位置・視差・固有運動の測定精度と大気に関する技術検討を行った。

1 科学検討

1.1 銀河定数

銀河定数 (局所静止基準 LSR から銀河中心までの距離 R_0 と LSR の銀河回転速度 Θ_0) は銀河系の回転を記述する最も基本的なパラメータである。近年、VLBI と赤外線観測は競うように銀河定数の高精度化を進めている。VLBI の VERA と VLBA による銀河系円盤の星形成領域のアstrometri と Sgr A* のアstrometri、赤外線の VLT と Keck による Sgr A* を高速周回する S2 のアstrometri が代表例である。表 1 にこれらの観測で得られた最新の推定値をまとめる。回転速度は太陽系の銀河回転角速度 $\Omega_\odot \equiv (\Theta_0 + V_\odot)/R_0$ で示しており、 V_\odot は太陽運動 (LSR に対する太陽系の相対運動) の銀河回転方向の成分である。

Ω_\odot は星形成領域の結果と Sgr A* 固有運動の結果が誤差範囲内で良く一致しており、1% (速度 3 km s^{-1} 相当) で決まったと言える。一方、 R_0 はお互いの誤差以上に大きい 3% (距離 0.2 kpc 相当) の違いが見られる。この違いは VLT と Keck では軌道計算に視線速度を含むかに起因し、星形成領域アstrometri では仮定する銀河回転モデル (銀河回転曲線の形状やポテンシャルの有無など) に起因すると考えられる。これらは単に観測回数や観測天体数で改善する統計誤差 (ばらつき) ではなく、仮定やモデルに依存する系統誤差 (偏り) である。今後、 R_0 を 3% より高精度で決定するためには別方法での測定が必要となる。

Sgr A* の年周視差は仮定やモデルを必要としない最も直接的な測定である。VLBA (Reid & Brunthaler 2020) では固有運動は測定されているが、視差は測定できていない。これは Sgr A* が低仰角であること、星間散乱 (diffractive scattering) の影響で検出可能な最大基線長が 43GHz で 1800 km に制限されることにより、位置測定精度が数 100 マイクロ秒角しかでないためであった。一方、VERA (Oyama et al. 2021 in prep.) では 2 ビーム位相や天頂大気遅延の補正向上と広帯域による高感度化により、VLBA より 3 倍高い位置測定精度へ到達し、図 1 に示すように視差が 117 ± 17 マイクロ秒角 ($R_0 = 8.5_{-1.1}^{+1.5} \text{ kpc}$ で 15% 相当) と測定されつつある。しかし、15% は先に述べた 3% に比べるとまだまだ不十分である。本計画では、Sgr A* のアstrometri を VERA 43GHz から EAVN 86GHz へ発展させ、さらなる銀河定数の高精度・高確度化を目指す。

表 1: 近年の銀河中心距離 R_0 と太陽系の銀河回転角速度 Ω_\odot の推定値

R_0 (kpc)	Ω_\odot ($\text{km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$)	Method	References
$8.178 \pm 0.013_{\text{stat}} \pm 0.022_{\text{sys}}$...	VLT S2 orbit	Gravity Collaboration (2019)
$7.946 \pm 0.050_{\text{stat}} \pm 0.032_{\text{sys}}$...	Keck S2 orbit	Do et al. (2019)
8.15 ± 0.15	30.32 ± 0.27	BeSSeL 147 src	Reid et al. (2019)
$7.92 \pm 0.16_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{sys}}$	$30.17 \pm 0.27_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{sys}}$	VERA 189 src	VERA Collaboration (2020)
...	30.39 ± 0.04	VLBA Sgr A*	Reid & Brunthaler (2020)
$8.5_{-1.1}^{+1.5}$	30.30 ± 0.02	VERA Sgr A*	Oyama et al. (2021) in prep.

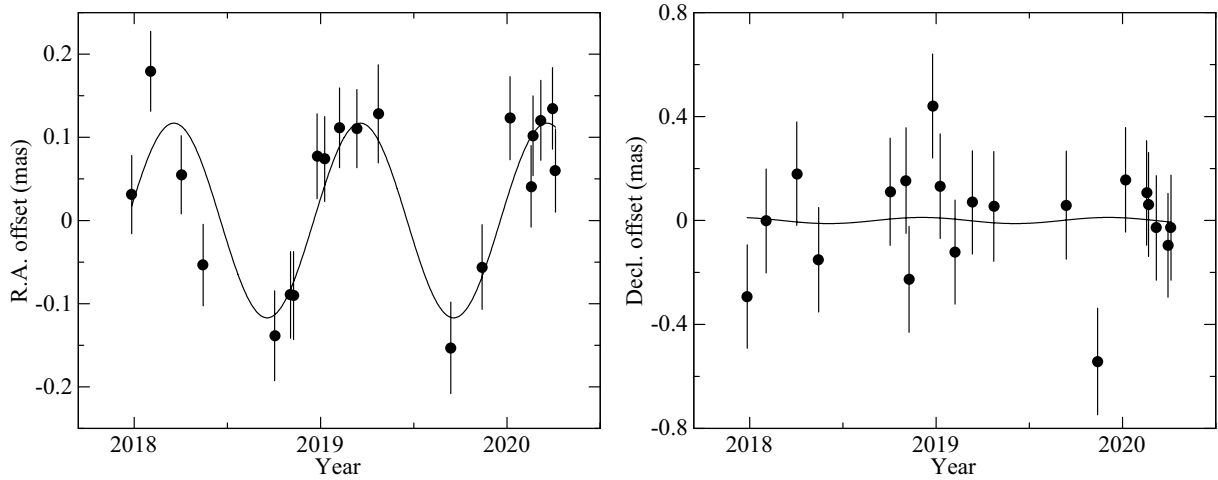


図 1: VERA 43GHz で観測中の Sgr A* の年周視差 (Oyama et al 2021 in prep.). 左が赤経、右が赤緯を示す。赤経では 1 年周期の年周視差が見える。黒線はフィッティング結果を表し、対応する年周視差は 117 ± 17 マイクロ秒角である。フィッティング残差は標準偏差で赤経が 61 マイクロ秒角、赤緯が 188 マイクロ秒角である。

1.2 銀河中心の中間質量ブラックホール (IMBH)

Sgr A* のアストロメトリでは、銀河定数決定のみならず、Sgr A* 周囲のダークマスを明らかにし、銀河中心の超巨大ブラックホールの形成と進化へアプローチする。Sgr A* にもっとも近い (離角 3.5 秒角 = 0.14 pc) 星団 IRS13E は Sgr A* の強力な潮汐力を受けながらも星団を維持しており、IRS13E 自身が星団を束縛する強い重力を持つ、つまり星団内に $1.4 \times 10^4 M_{\odot}$ の中間質量ブラックホール (IMBH) の存在が示唆される (Fritz et al. 2010)。

ある程度大きな質量の IMBH が Sgr A* の近くに存在した場合、その重力で Sgr A* をふらつかせる。Sgr A* のアストロメトリからは、Sgr A* 自身のふらつき (core wander)、特異運動、加速度の 3 パラメータが高精度で得られる。最新の観測 (Reid & Brunthaler 2020; Oyama et al. 2021 in prep.) から、ふらつき 0.2 mas、特異運動 3 km s^{-1} 、加速度 $0.1 \text{ km s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ の上限値が得られ、Sgr A* は銀河回転の力学的中心に対しほぼ静止することがわかった。3 パラメータから推定されるダークマスの上限値は、Sgr A* から $[\sim 0.001, \sim 0.1]$ pc の範囲において、 $3 \times 10^4 M_{\odot}$ である (図 2 を参照)。これらの数値が IRS13E で存在が示唆される IMBH の質量 $1.4 \times 10^4 M_{\odot}$ へ迫りつつある。つまり、Sgr A* のふらつきや加速度の直接検出の可能性が出てきた。

3 パラメータのうち、特異運動 3 km s^{-1} は主に星形成領域アストロメトリの Ω_{\odot} の誤差 1% に起因する (Sgr A* の固有運動誤差 0.1% より大きい) ため、前述の通り今後は劇的な向上は期待できない。加速度の精度は観測期間に対し $5/2$ 乗で向上する。現状は VLBA と VERA を合わせて 25 年間で $0.1 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ であるが、この精度は 30 年間 (VLBA と VERA に追加 5 年) で 1.6 倍、40 年間 (追加 15 年) で 3.3 倍向上する。ふらつきは年周視差フィッティングの残差から推定され位置精度に比例する。今後の Sgr A* のアストロメトリでは、観測期間延長で加速度を、位置精度向上でふらつきを抑えこむことが重要となる。

1.3 Central Molecular Zone (CMZ)

銀河中心 300pc は銀河系全体の約 10% の分子ガスが集中し、Central Molecular Zone (CMZ) と呼ばれる。CMZ の分子ガスは銀河系の棒状構造がもたらす力学的影響により、図 3 のような楕円軌道を示すことが理論で提唱されており (Blitz et al. 1993)、観測による CO の銀経-視線速度図もこれを支持している。図中の外側の大きな軌道は X1、内側の小さな軌道は X2 と呼ばれ、CMZ を代表する軌道群である。

CMZ のアストロメトリでは X1/X2 軌道を固有運動を含めた 3 次元運動で明らかにする。これまでに先行して VERA で最も明るい 1000 Jy を超える水メーザー源 Sgr B2 の固有運動計測を行った (Sakai et al. 2021 in prep.)。Sgr B2 はこれまで X1 と X2 の交点付近に位置すると考えられていたが、今回の固有運動ベクトルからはそれよりや

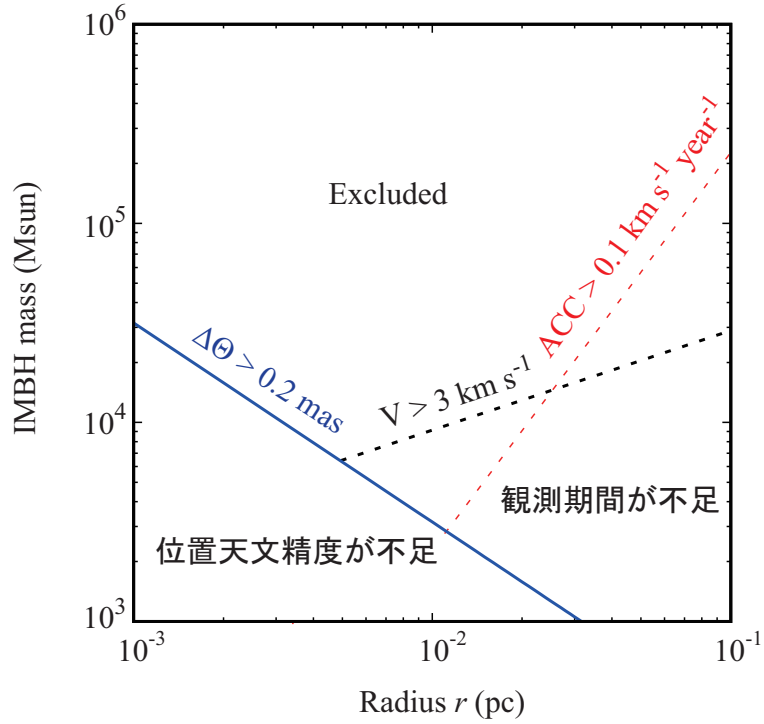


図 2: IMBH の質量と軌道半径 (Sgr A*からの距離) への制限 (Reid & Brunthaler 2020 を引用)。速度による制限 (黒破線) は、 $M_{\text{IMBH}} = \sqrt{r M_{\text{SgrA}^*} G^{-1}} V_{\text{SgrA}^*}$ を仮定した (Sgr A*の質量は、 $4 \times 10^6 M_{\odot}$ を仮定した)。加速度による制限 (赤破線) は、 $M_{\text{IMBH}} = r^2 a G^{-1}$ を仮定した。位置天文精度による制限 (青実線) は、 $M_{\text{IMBH}} = r^{-1} \Delta\Theta R_0 M_{\text{SgrA}^*}$ を仮定した ($R_0 = 8.15 \text{ kpc}$ を仮定した)。

や内側の X2 軌道上に位置することがわかった。EAVN の高感度では 1 Jy レベルのメーザー源 10 天体まで観測対象が増加する。Sgr B2 の対照に位置する Sgr C やより外側の X1 軌道に付随する新たなメーザー源を観測することにより CMZ の軌道運動をより詳しく調べることができる。

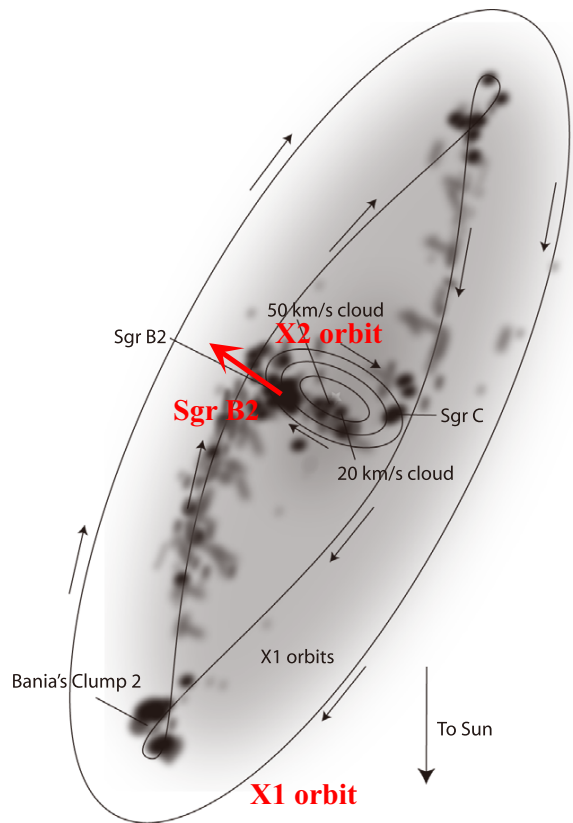


図 3: CMZ の X1/X2 軌道と VERA で観測された Sgr B2 の運動 (Sakai et al. 2021 in prep.)。グレーの背景は Bally et al. (2010) の想像図。

2 技術検討

2.1 Sgr A*の86GHz帯観測と位置精度の推定

Sgr A*の年周視差とふらつきを捉えるためには、1回の観測での位置測定精度の向上が課題となる。位置測定精度はキャリブレーション精度向上と基線長延長で向上する。

基線長延長について考える。Sgr A*は星間散乱 (diffractive scattering と refractive scattering がある) の影響を受け、検出可能な最大基線長は周波数により異なる。43GHz では diffractive scattering の影響で $250M\lambda = 1800 \text{ km}$ 以内に制限され (Johnson et al. 2018)、86GHz では diffractive scattering の影響は弱い³が refractive scattering の影響が $1G\lambda = 3500 \text{ km}$ 以上で強くなる (Issaoun et al. 2019)。86GHz では 43GHz より最大基線長が約2倍伸びる。

基線長が伸びた効果を考える。VERA 43 GHz と EAVN 86 GHz で Sgr A*観測の位置誤差を

$$\Delta\theta \approx \frac{c\Delta\tau_{\text{err}}}{D_{\text{proj}}} \approx \frac{c\Delta\tau_{\text{err}}}{\lambda} \cdot \theta_{\text{beam}} \quad (1)$$

の式を用いて理論的に推定した。 $c\Delta\tau_{\text{err}}$ は Sgr A*と参照電波源 J1745–2820 の2天体間の遅延誤差である。 λ は波長で 43 GHz で 7 mm、86 GHz で 3.5 mm である。 θ_{beam} はビームサイズで VERA 43 GHz で赤経、赤緯方向に $(\theta_\alpha, \theta_\delta) = (0.5, 1.0) \text{ mas}$ 、EAVN 86 GHz で $(0.125, 0.25) \text{ mas}$ とした。相対 VLBI の場合、熱雑音誤差より大気などの系統誤差が大きい。表1に各誤差要因の位置測定誤差をまとめる。total は全誤差要因の root-sum-square である。

理論的に推定した 43GHz の位置誤差 $(\Delta\theta_\alpha, \Delta\theta_\delta)_{\text{the}} = (96, 190) \mu\text{as}$ は実際の VERA 43 GHz の視差フィッティング残差から推定される位置誤差 $(\Delta\theta_\alpha, \Delta\theta_\delta)_{\text{res}} = (61, 188) \mu\text{as}$ とファクター 1.5 で一致しており概ね実観測に則している。表1を比較すると、EAVN 86 GHz は VERA 43GHz に比べ、位置測定精度が約 1.8 倍向上すると期待される。

表 2: VERA 43 GHz と EAVN 86 GHz で理論的に推定される位置誤差。

Error source	43 GHz		86 GHz	
	$\Delta\theta_\alpha$ (μas)	$\Delta\theta_\delta$ (μas)	$\Delta\theta_\alpha$ (μas)	$\Delta\theta_\delta$ (μas)
troposphere	93	186	46	93
ionosphere	3	6	0	1
instrument	7	14	4	7
station coordinate	3	6	1	3
source coordinate	10	10	10	10
thermal noise	20	40	5	10
refractive scattering	0	0	25	50
total	96	190	54	106

各誤差要因の推定について下記にまとめる。詳細は Nagayama et al. (2020) と Oyama et al. (2021) in prep. を参照。

2.1.1 troposphere

天頂大気遅延誤差 $c\tau_{\text{err}} \approx 20 \text{ mm}$ (Honma et al. 2008b) と Sgr A*と参照電波源 J1745–2820 の間の $\Delta \text{sec } Z \approx 0.065$ より2天体間の遅延誤差は $c\Delta\tau_{\text{err}} \approx c\tau_{\text{err}} \cdot \Delta \text{sec } Z \approx 1.3 \text{ mm}$ と計算される。これを式 (1) に代入する。

2.1.2 ionosphere

電離層の total electron content (TEC) の誤差は 10 TEC unit と推定される (Ho et al. 1997)。対応する遅延誤差は $c\tau_{\text{err}} = c \cdot (1.3445 \times 10^{-7}) \cdot (\text{TEC}_{\text{err}} \times 10^{16}) \cdot \nu^{-2}$ より 43 GHz で 2 mm、86 GHz で 0.5 mm となる。Sgr A*と

参照電波源 J1745–2820 の間の $\Delta \sec Z' \approx 0.023$ を使用して 2 天体間の遅延誤差は $c\Delta\tau_{\text{err}} \approx c\tau_{\text{err}} \cdot \Delta \sec Z'$ より 43 GHz で 0.04 mm、86 GHz で 0.01 mm と計算される。これを式 (1) に代入する。

2.1.3 instrument

VERA 2 ビーム間の遅延誤差は離角に依存せず $c\tau_{\text{err}} \approx c\Delta\tau_{\text{err}} \approx 0.1$ mm と推定される (Honma et al. 2008a)。これを式 (1) に代入する。

2.1.4 station coordinate

局位置誤差 $c\tau_{\text{err}} \approx 3$ mm (Jike et al. 2008; 2018) と離角 $\theta_{\text{SA}} \approx 0.67^\circ \approx 0.012$ より 2 天体間の遅延誤差は $c\Delta\tau_{\text{err}} \approx c\tau_{\text{err}} \cdot \theta_{\text{SA}} \approx 0.04$ mm と計算される。これを式 (1) に代入する。

2.1.5 source coordinate

絶対座標の誤差 10 mas (参照電波源 J1745–2820 の誤差に依存) は位置精度 $10 \mu\text{as}$ へ伝播すると考えられる (Reid & Honma 2014)。

2.1.6 thermal noise

VERA 43GHz では J1745–2820 の位相補償イメージのダイナミックレンジは典型的に $\text{SNR} \approx 13$ であった。対応する位置誤差を $\Delta\theta \approx 0.5 \cdot \theta_{\text{beam}} / \text{SNR}$ で計算した。EAVN 86GHz でも VERA 43GHz と同じダイナミックレンジを仮定した。

2.1.7 refractive scattering

Sgr A* は 86GHz では $1G\lambda$ で 100 mJy で検出される。refractive noise は 86 GHz では 20 mJy と見積もられており、 $\text{SNR}=5$ 程度の影響が考えられる。位置誤差は $\Delta\theta \approx \theta_{\text{beam}} / \text{SNR}$ から赤経方向が $25\mu\text{as}$ 、赤緯方向が $50 \mu\text{as}$ と推定される。

2.2 Sgr A* の視差・固有運動精度の推定

EAVN 86GHz で 5 年間観測した場合に到達する視差と固有運動の精度をシミュレーションで見積もった。1 回の観測の位置誤差を表 2 より $(\sigma_\alpha, \sigma_\delta) = (50, 100) \mu\text{as}$ とした。観測頻度は視差ピークに集中した場合と等間隔の場合の 2 パターンを試した。ここで視差ピークとは赤経の視差振幅ピークを 1 とした時、0.8 を超える通日 40 日–113 日 (2 月 9 日–4 月 23 日) と通日 222 日–296 日 (8 月 10 日–10 月 23 日) に集中した観測を指す。視差ピークが等間隔に比べ視差精度は 1.3 倍良いことがわかった。固有運動精度は両者で変わらなかった。図 4 に視差ピークで観測した場合の視差・固有運動精度を示す。

視差精度は $\sigma_\pi \approx \sigma_\alpha / \sqrt{N}$ で表され (2.2.1 の付録を参照)、赤経方向の位置精度 $\sigma_\alpha = 50 \mu\text{as}$ の場合、5 年間 \times 年間 20 回=計 100 回の観測で $5 \mu\text{as}$ (相対誤差 4%) となる。目標とする視差精度 3% ($125 \mu\text{as} \times 0.03 = 4 \mu\text{as}$) は、観測回数を計 160 回へ増加するか位置精度を $40 \mu\text{as}$ へ向上することで達成可能で現実的な数字と言える。

固有運動精度は $\sigma_\mu \approx \sigma_p \cdot \sqrt{12} / \sqrt{Nt^2}$ で表され (2.2.1 の付録を参照)、5 年間 \times 年間 20 回=計 100 回の観測で $5 \mu\text{as yr}^{-1}$ (相対誤差 0.1%) と推定される。これは VLBA と VERA を合わせた 25 年間の結果と同レベルである。

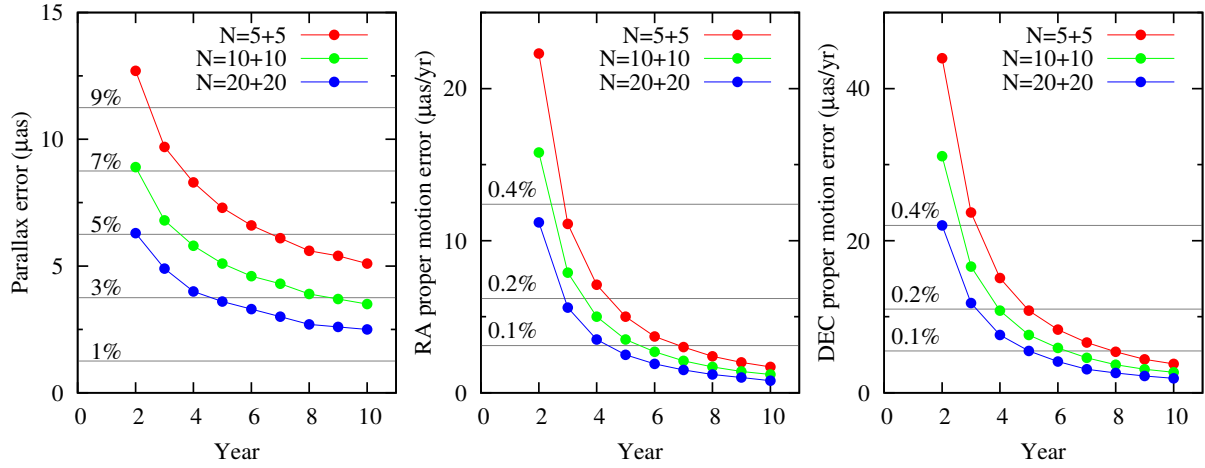


図 4: 視差誤差 (左)、赤経固有運動誤差 (中央)、赤緯固有運動誤差 (右)。3月+9月に5+5回 (赤)、10+10回 (緑)、20+20回 (青) 観測した場合を示す。灰色の実線は相対誤差 (%) を示す。

2.2.1 付録：視差・固有運動誤差の近似式

視差ピークで観測した場合、視差誤差 σ_π は位置誤差 σ_p と観測回数 N から

$$\sigma_\pi \approx \frac{\sigma_p}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

で推定できる。赤経方向の視差振幅が赤緯方向より著しく大きい場合 (Sgr A*のように振幅比が赤経:赤緯=1:10の場合)、赤経方向の位置誤差 σ_α を用いて下記の通り近似できる。

$$\sigma_\pi \approx \frac{\sigma_\alpha}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

固有運動誤差 σ_μ を位置誤差 σ_p 、観測回数 N 、観測期間 t から推定する。固有運動誤差 (直線近似の傾きの誤差) は

$$\sigma_\mu = \sigma_p \sqrt{\frac{N}{N \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2}} = \sigma_p \sqrt{\frac{1}{\sum t_i^2 - N(\sum t_i/N)^2}} \quad (4)$$

で与えられる。ここで $\sum t_i/N$ は平均値で等間隔の観測場合は $\sum t_i/N = t/2$ と表される。式 (4) は

$$\sigma_\mu = \sigma_p \sqrt{\frac{1}{\sum t_i^2 - Nt^2/4}} \quad (5)$$

となる。2乗の和の公式 $\sum k^2 = 1/6 \cdot N(N+1)(2N+1)$ と観測間隔 $\Delta t = t/N$ を用いると、 $\sum t_i^2$ は

$$\begin{aligned} \sum t_i^2 &= t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 + \dots \\ &= (1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots) \cdot \Delta t^2 \\ &= [1/6 \cdot N(N+1)(2N+1)] \cdot \Delta t^2 / N^2 \end{aligned} \quad (6)$$

となる。式 (6) を用いると式 (5) の分母は

$$\begin{aligned} \sum t_i^2 - Nt^2/4 &= [1/6 \cdot N(N+1)(2N+1)] \cdot t^2/N^2 - Nt^2/4 \\ &= \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{2N} + \frac{1}{6N^2} \right) Nt^2 \end{aligned} \quad (7)$$

となる。式 (7) は $N \gg 20$ の場合、 $1/(2N)$ と $1/(6N^2)$ の項は $1/12$ より十分小さいので、

$$\sum t_i^2 - Nt^2/4 \approx \frac{1}{12} Nt^2 \quad (8)$$

のように近似できる。式 (8) を式 (5) へ代入すると、

$$\sigma_{\mu} \approx \sigma_p \sqrt{\frac{12}{Nt^2}} \quad (9)$$

となり、位置誤差 σ_p 、観測回数 N 、観測期間 t から固有運動誤差 σ_{μ} を推定できる。近似の影響は $N = 10$ で 30%、 $N = 20$ で 14%、 $N \geq 30$ で 10% 未満である。 $N \leq 20$ の場合は近似せず式 (7) を式 (5) へ代入すると良い。図 5 にシミュレーションと近似式の比較を示す。両者は良く一致している。

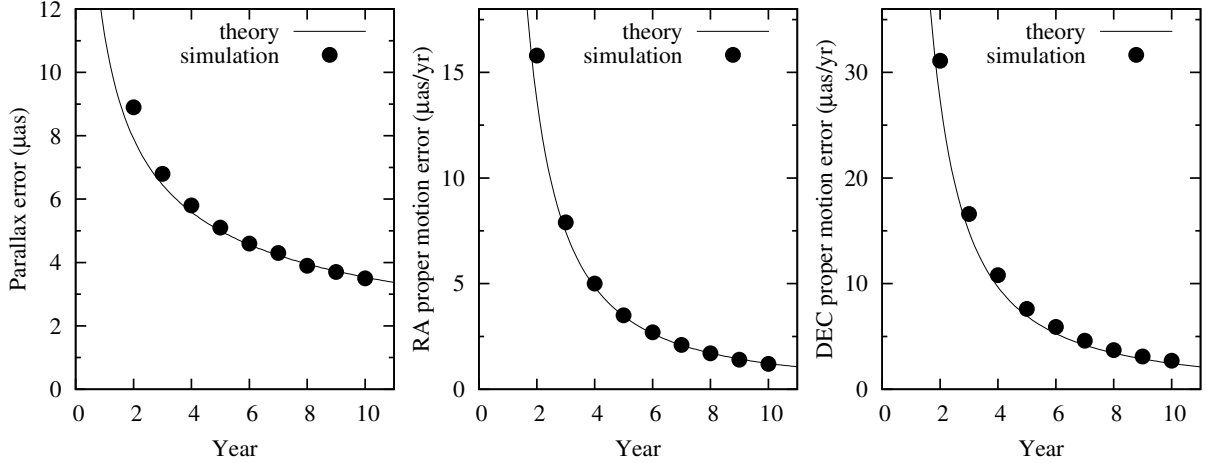


図 5: シミュレーションと近似式の比較。観測期間に対する視差誤差 (左)、赤経固有運動誤差 (中央)、赤緯固有運動誤差 (右)。黒丸がシミュレーション結果、実線が近似式を表す。位置誤差 $(\sigma_{\alpha}, \sigma_{\delta}) = (50, 100) \mu\text{as}$ 、3月に10回と9月に10回の年間20回の観測数を想定。近似式は視差誤差が $\sigma_{\pi} \approx \sigma_{\alpha} / \sqrt{N}$ 、固有運動誤差が $\sigma_{\mu} \approx \sigma_p \sqrt{12} / \sqrt{Nt^2}$ を表す。観測回数 N は観測期間 t に比例するため、観測期間に対し視差誤差は $1/2$ 乗、固有運動誤差は $3/2$ 乗で減少。

2.3 VERA 86GHz の大気的光学的厚みとシステム雑音温度の推定

VERA で 86GHz 帯が観測可能かを大気観点で調べる。VERA で sec Z 法により測定された 22 GHz の Opacity τ_0 から 86 GHz の Opacity τ_0 を求める。まず大気モデルを用いて Opacity と Water vapor density ρ_v の関係を調べる。大気モデルとして今回は International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R) 2013 の “Approximate estimation of gaseous attenuation in the frequency range 1–350 GHz” を使用した。

図 6(左) に ITU-R 2013 のモデルで推定された Opacity のスペクトルを示す。図 6(中央) に示すように Opacity は Water vapor density の増加に伴い増加する。6.7GHz と 22GHz では 1 次関数的に、その他の周波数では 2 次関数的に増加する。この関係を 1 次、2 次関数で近似した係数を表 3 にまとめる。このように ITU-R 2013 の大気モデルを用いると 22GHz の Opacity から Water vapor density が得られ、他の周波数の Opacity を推定できる。図 6(右) に 22GHz の Opacity と各周波数の Opacity の関係を示す。

22 GHz の天頂の光学的厚み τ_K は water vapor density ρ_v と表 2 の係数 α_* を用いて

$$\tau_K = \alpha_{0K} + \alpha_{1K} \rho_v \quad (10)$$

$$\rho_v = \frac{\tau_K - \alpha_{0K}}{\alpha_{1K}} \quad (11)$$

と表すことができる。周波数 X の天頂の光学的厚み τ_X は

$$\tau_X = \alpha_{0X} + \alpha_{1X} \rho_v + \alpha_{2X} \rho_v^2 \quad (12)$$

$$= \alpha_{0X} + \alpha_{1X} \left(\frac{\tau_K - \alpha_{0K}}{\alpha_{1K}} \right) + \alpha_{2X} \left(\frac{\tau_K - \alpha_{0K}}{\alpha_{1K}} \right)^2 \quad (13)$$

と表され、22 GHz の天頂の光学的厚み τ_K と表 2 の係数 α_* から推定できる。

実測の sec Z 測定結果と大気モデルを比較した。図 7 に 22GHz と 43GHz の Opacity の相関図を示す。43 GHz の Opacity が 0.15 未満ではモデルと実測値が数%で一致する。0.2 付近ではモデルが実測値より約 20% 過大評価する。

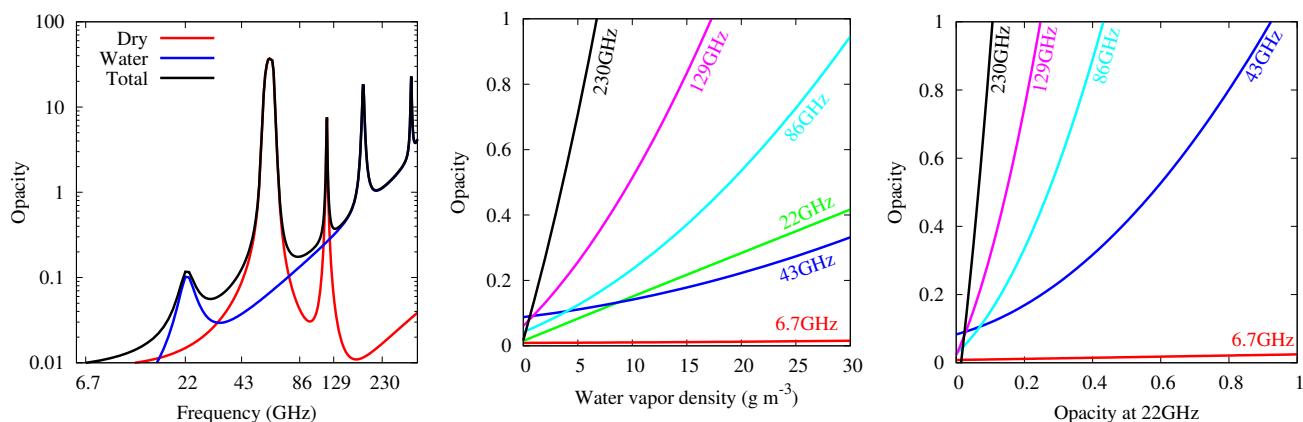


図 6: (左): 海拔 0m、1013hPa、15°C、water vapor density=7.5 g m⁻³ の場合の Dry air, Water vapor, Total (Dry air と Water vapor の和) の天頂方向の Opacity。(中央):各周波数の Water vapor density と Opacity の関係。(右):22GHz の Opacity と他の周波数の Opacity の関係。

表 3: Opacity (τ) と water vapor density (ρ_v) を $\tau = \alpha_0 + \alpha_1\rho_v + \alpha_2\rho_v^2$ で近似した場合の係数 (図??中央を近似)。

ν (GHz)	α_0	α_1 (m ³ g ⁻¹)	α_2 (m ⁶ g ⁻²)	α_0	α_1 (m ³ g ⁻¹)	α_2 (m ⁶ g ⁻²)
	MIZ (75.6m, 1004hPa)			IRK (541.6m, 950hPa)		
22	0.01609	0.01344	0.00000	0.01543	0.01385	0.00000
43	0.08624	0.00391	0.00014	0.07674	0.00370	0.00014
86	0.04149	0.01359	0.00055	0.03722	0.01286	0.00055
	OGA (222.9m, 987hPa)			ISG (38.5m, 1008hPa)		
22	0.01586	0.01356	0.00000	0.01615	0.01341	0.00000
43	0.08321	0.00385	0.00014	0.08698	0.00393	0.00014
86	0.04013	0.01336	0.00055	0.04181	0.01364	0.00055

W-band の天頂のシステム雑音温度 $T_{\text{sys}*}$ は τ_W を用いて

$$T_{\text{sys}*} = T_{\text{sky}} \cdot (e^{\tau_W} - 1) + T_{\text{rx}} \cdot e^{\tau_W} \quad (14)$$

で推定できる。ここで T_{sky} は外気温、 T_{rx} は W-band の受信器雑音温度 90 K (KVN ステータスレポートの 80-100 K より) とした。

図 8 に K, Q, W-band の τ_0 と $T_{\text{sys}*}$ の年周変化を、図 9 に全観測数に対する割合を示す。推定された W-band の τ_0 は 0.1-0.7 で、良い観測条件の $\tau_0 < 0.2$ の割合は、水沢が 69%、入来が 66%、小笠原が 26%、石垣島が 9% である。水沢と入来では 11 月から 4 月の半年間は K,Q バンドと同レベルで W バンドが観測可能だろう。一方、石垣島はかなり厳しく、冬場の極めて限られた期間 (年間 30 日程度) しか良い条件で観測できないと予測される。周波数位相補償、明るい天体を選択、大口径望遠鏡の利用などの工夫が必要となるだろう。

推定された W-band の天頂方向の $T_{\text{sys}*}$ を見ると Sgr A* や銀河中心天体で赤経方向の視差がピークとなる 3 月と 9 月は約 200 K である。これらの天体の仰角を考慮した観測中の $T_{\text{sys}*}$ は 300-400 K と予測される。W バンドのコヒーレンスタイム 10 秒、 $T_{\text{sys}*} = 350\text{K}$ で推定される基線ノイズレベルは VERA(20m、能率 20%、帯域幅 2GHz)

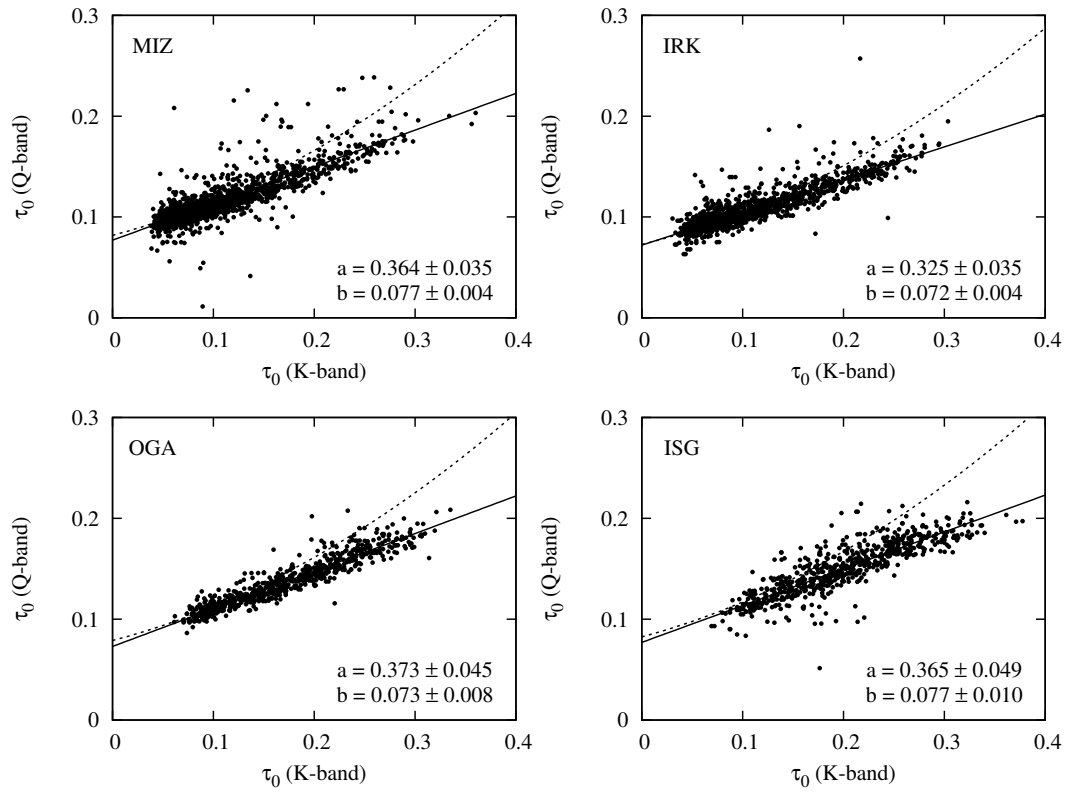


図 7: K-band と Q-band の τ_0 の相関図。実線と右下の係数は $y = ax + b$ の近似式を示す。点線は ITU-R 2013 のモデルを示す。

基線で 87 mJy、VERA と野辺山 (45m、能率 45%、帯域幅 2GHz) 基線で 25 mJy である。Sgr A* のフラックス密度は W バンド、1G λ で 100 mJy である。VERA 基線では検出が難しいが、VERA と野辺山基線であれば信号雑音比 4 で検出可能だろう。

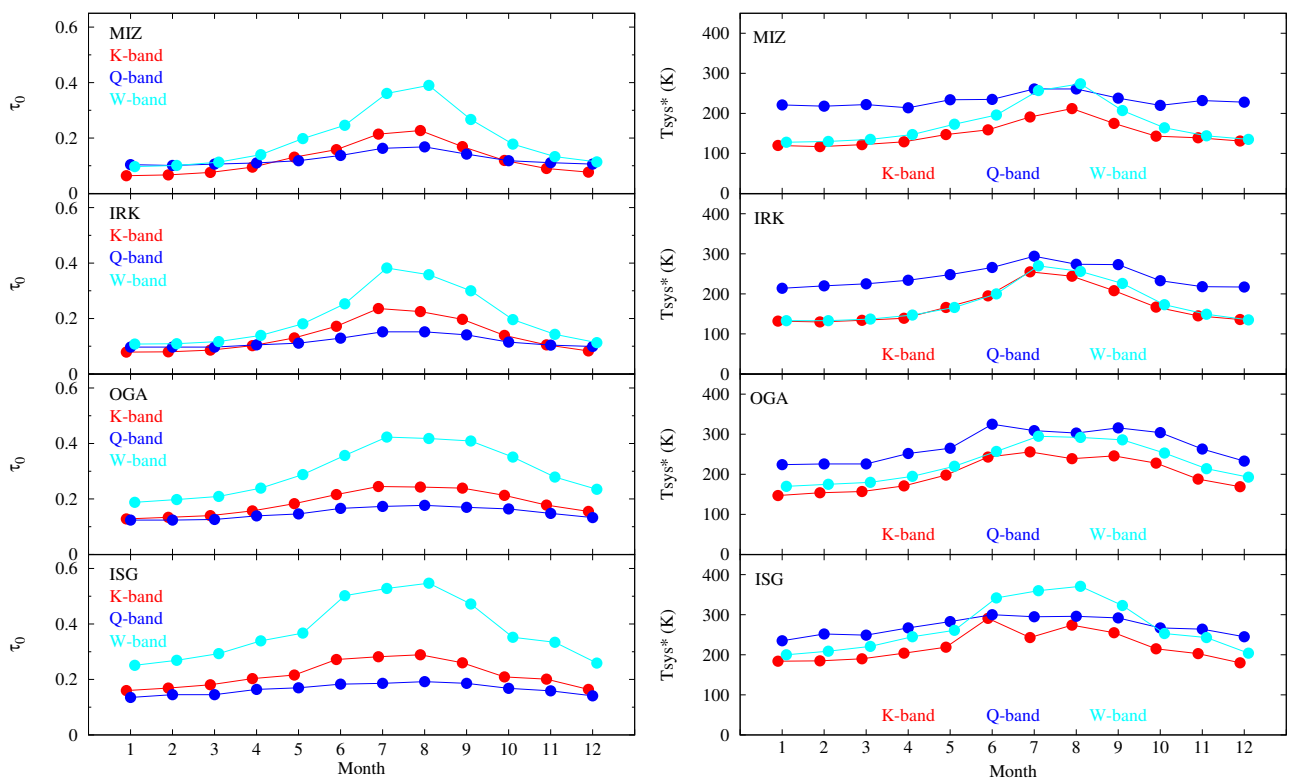


図 8: τ_0 と T_{sys}^* の年間の変化。K, Q-band は sec Z による実測値、W-band は ITU-R 2013 のモデルを用いた推定値。

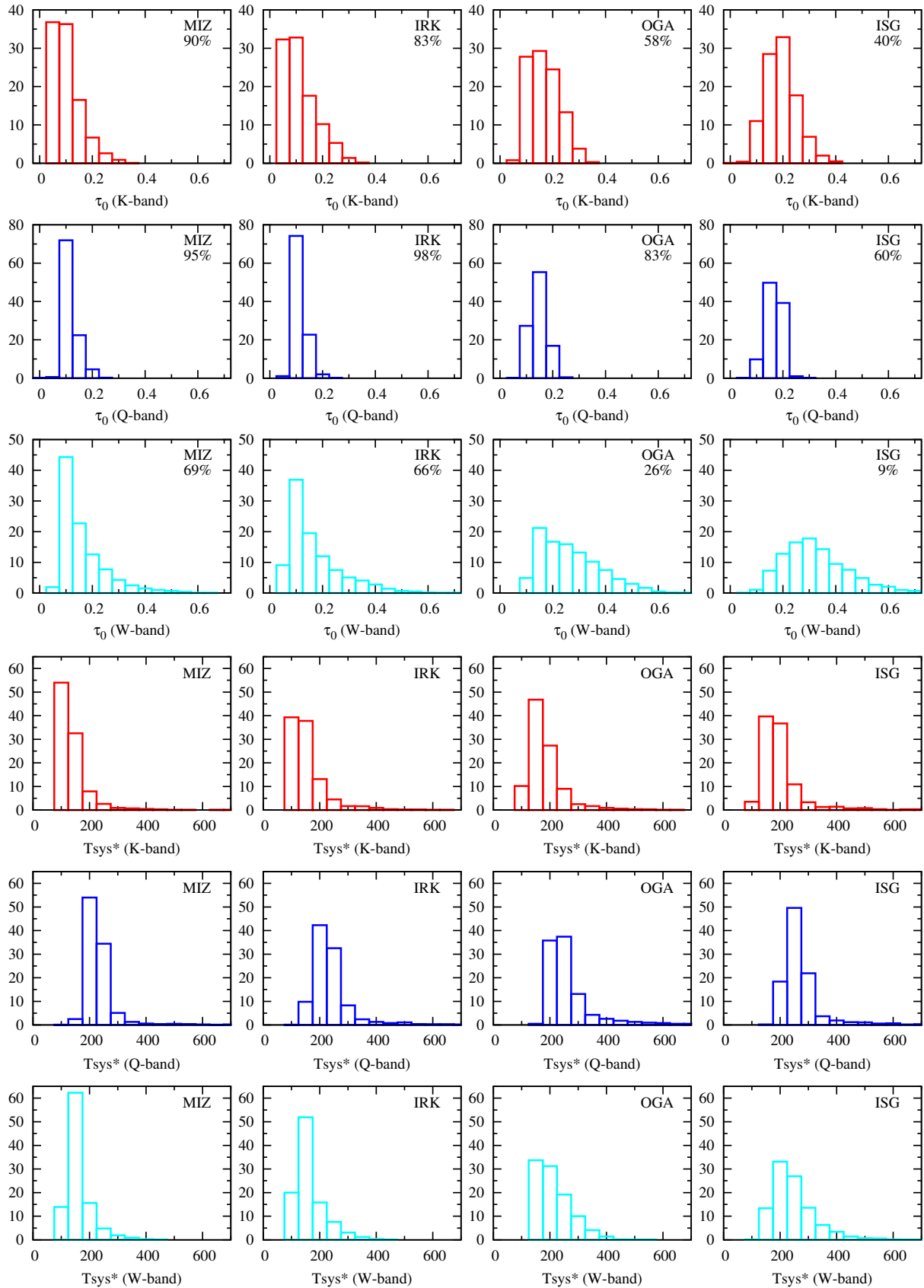


図 9: K, Q, W-band の τ_0 と T_{sys^*} の測定数に対する割合。縦軸はパーセント。右上の数字 (%) は $\tau_0 < 0.2$ の割合を表す。K, Q-band は sec Z による実測値、W-band は ITU-R 2013 のモデルを用いた推定値。

参考文献

- Bally, J., Aguirre, J., Battersby, C., et al. 2010, *ApJ*, 721, 137. doi:10.1088/0004-637X/721/1/137
- Do, T., Hees, A., Ghez, A., et al. 2019, *Science*, 365, 664. doi:10.1126/science.aav8137
- Fritz, T. K., Gillessen, S., Dodds-Eden, K., et al. 2010, *ApJ*, 721, 395. doi:10.1088/0004-637X/721/1/395
- Gravity Collaboration, Abuter, R., Amorim, A., et al. 2019, *A&A*, 625, L10. doi:10.1051/0004-6361/201935656
- Issaoun, S., Johnson, M. D., Blackburn, L., et al. 2019, *ApJ*, 871, 30
- Johnson, M. D., Narayan, R., Psaltis, D., et al. 2018, *ApJ*, 865, 104
- Nagayama, T., Kobayashi, H., Hirota, T., et al. 2020, *PASJ*, 72, 52. doi:10.1093/pasj/psaa034
- Oyama, T., et al. 2021, *PASJ*, in prep.
- Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler, A., et al. 2019, *ApJ*, 885, 131. doi:10.3847/1538-4357/ab4a11
- Reid, M. J., & Brunthaler, A. 2020, *ApJ*, 892, 39
- Sakai, D., et al. 2021, *PASJ*, in prep.
- VERA Collaboration, Hirota, T., Nagayama, T., et al. 2020, *PASJ*, 72, 50. doi:10.1093/pasj/psaa018
- International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R), 2013, Attenuation by atmospheric gases, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-S!!PDF-E.pdf

EAVN 86GHz による M87 ジェットモニター

紀基樹 (工学院大)、新沼浩太郎 (山口大)、秦和弘 (水沢 VLBI 観測所)

1. 研究の意義・背景

EHT コラボレーションによる 2019 年 4 月の M87 のブラックホールシャドウとそれを縁取るフォトンリングの画像と論文の発表以降、ブラックホールに関する研究が急速に進展している。天体物理学における長年の未解決問題「ジェット噴出メカニズム」の解明に向けて、86GHz 帯 VLBI はブラックホール近傍のプラズマ現象を探る強力なツールである。86GHz 帯 VLBI は、フォトンリングとジェットをつなぐスイートスポットと言えよう。しかし現存する 86GHz 帯 VLBI アレイの性能や観測時間には制約がある。米国 VLBA アレイは 86GHz 帯が 8 局しかなく、その性能は限られている。また、欧州 GMVA アレイは観測セッションがわずかに年 2 回にとどまる。東アジア VLBI 観測網 (EAVN) に 86GHz 受信機を実装した VERA 局が加わり通年の定常観測が実現すると、EAVN-hi は世界屈指の強力な 86GHz 帯 VLBI アレイとなる。

2. 何をどこまで明らかにするか

2-1. フォトンリングとジェット根本のつながり

2009-2017 年における初期の EHT アレイ観測データも含めた観測データに対する幾何学的モデルの比較から、フォトンリング南側の輝度ピーク位置が年スケールでゆれ動いていることが分かった ([1])。また、EAVN 43GHz による 2017 年から 2019 年にかけての M87 ジェット根本の撮像から、ジェット噴出角が年スケールの周期変動で揺れ動いていることを発見し、ジェット噴出角変動の起源について議論が進められている ([2]) (図 1 上段)。将来の EAVN 86GHz では空間分解能が $300 \mu\text{as}$ (40Rs) スケールに達するので GRMHD シミュレーションによる典型的なサイズと同程度となり、直接の対比が可能になる。今後、図 1 下段例のようなフォトンリング (EHT 230GHz) とジェット根本 (EAVN 86GHz) の準同時マルチエポック観測を行い、フォトンリングとジェット根本のつながりとその変化を観測的に明らかにする。

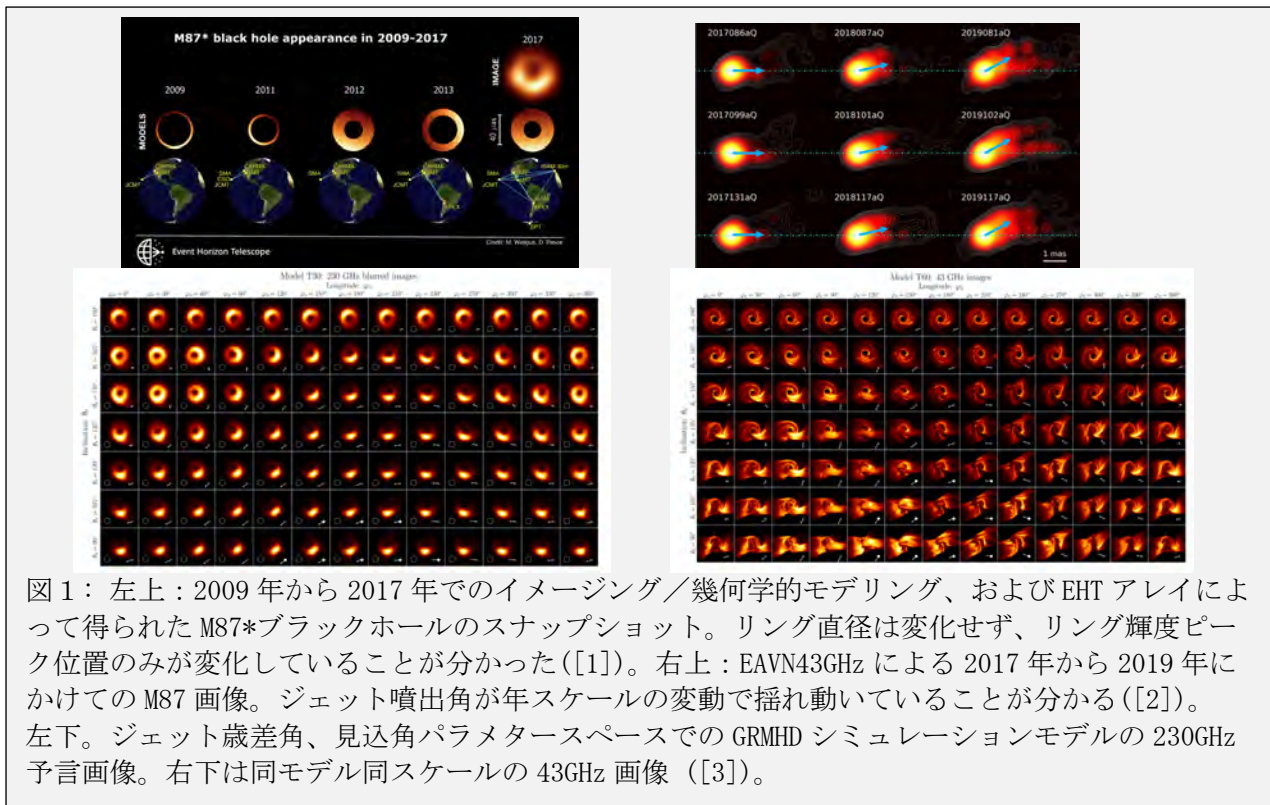
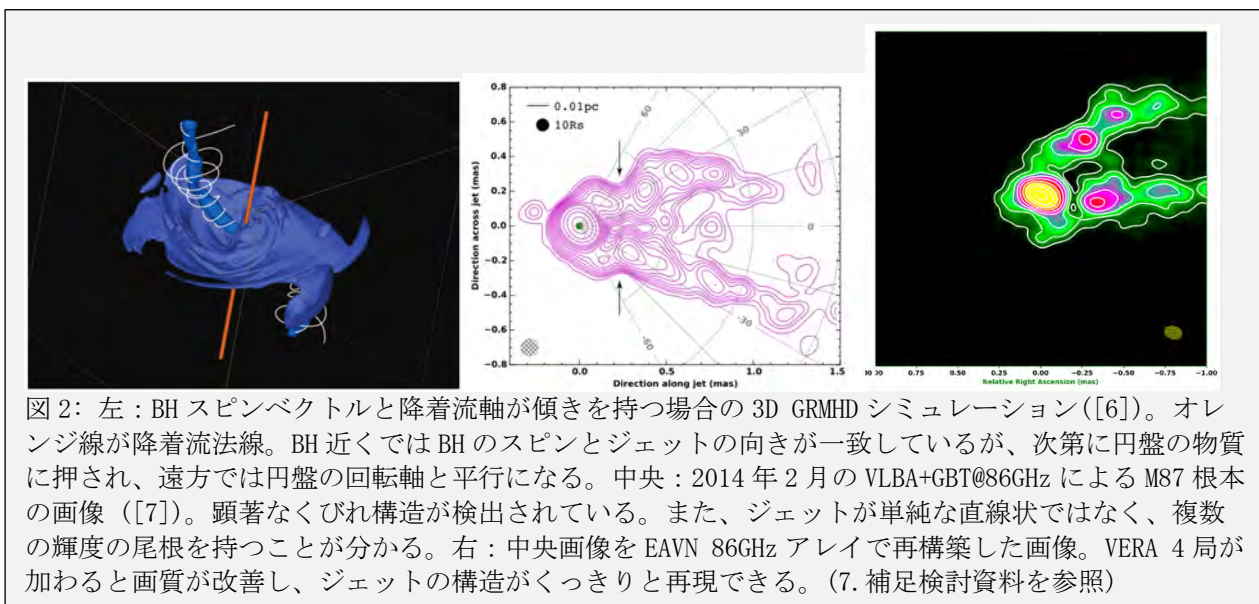


図 1： 左上：2009 年から 2017 年でのイメージング／幾何学的モデリング、および EHT アレイによって得られた M87*ブラックホールのスナップショット。リング直径は変化せず、リング輝度ピーク位置のみが変化していることが分かった ([1])。右上：EAVN43GHz による 2017 年から 2019 年にかけての M87 画像。ジェット噴出角が年スケールの変動で揺れ動いていることが分かる ([2])。左下。ジェット歳差角、見込角パラメータスペースでの GRMHD シミュレーションモデルの 230GHz 予言画像。右下は同モデル同スケールの 43GHz 画像 ([3])。

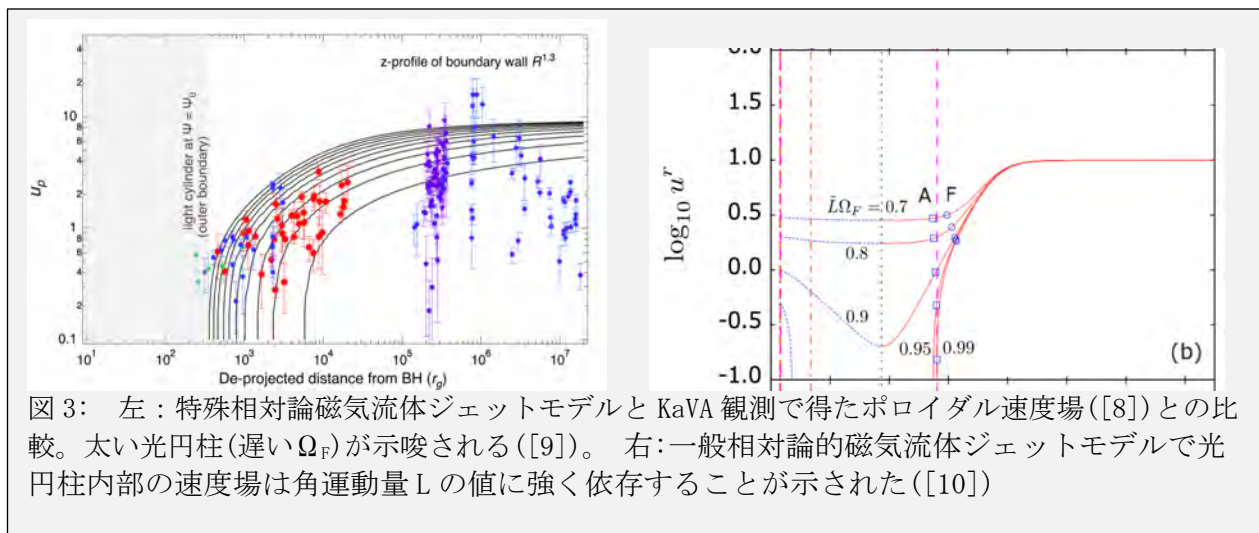
2-2. ジェット根本の折れ曲がり構造の時間変化のモニター

2-1 で紹介したジェット噴出角の周期変動を起こす可能性のひとつとして考えられるレンス・ティリング効果を含む GRMHD シミュレーションが近年行われつつある ([4], [5])。図 2 左に示すように、BH スピンベクトルとジェット噴出の向きがレンス・ティリング効果で揃うのはおよそ数 10Rg(重力半径)以内で、より遠方ではジェットの向きは円盤の回転軸向きに揃う ([6])。折れ曲がるジェットの時間変化は、理論モデルを検証するための重要な情報を与えるが、まだ 86GHz の通年定常観測が難しいためよく分かっていない。ジェット根本 (EAVN 86GHz) の通年定常モニター観測を行い、ジェット根本の折れ曲がり構造の時間変化を観測的に明らかにし、ジェット噴出角の周期変動の起源を探る。



2-3. M87 ジェット最深部の速度場計測

ジェットの速度場はジェットを特徴づける基本物理量である。KaVA 大規模観測プログラムで得た M87 速度場 (2016 年度 at 22/43GHz) は、GRMHD シミュレーション理論予言よりも加速開始が遅いことを示唆した ([8])。この GRMHD シミュレーション結果と観測のギャップを埋める可能性のひとつとして、光円柱が太いため加速開始の位置が遠方になる説が提案されている ([9])。さらに、一般相対論効果を考慮した光円柱内の速度場は、ジェット中のプラズマの回転角運動量 (L) に敏感であることが示された ([10])。ジェット根本 (EAVN 86GHz) の高頻度定常モニター観測を実施して M87 最深部の速度を計測し、ジェット最深部のプラズマ状態 (角速度等) に制限をつける。



3. 期待される学術的インパクト

天体物理学における長年の未解決問題「ジェット噴出メカニズム」の解明に向けた本質的な進展が期待される。

4. 新規性・独創性・他コミュニティとの連携

東アジア VLBI コミュニティーで切り開いてきた KaVA/EAVN22-43GHz における高頻度 M87 モニター観測的研究([8], [2])における特長を生かしつつ、86GHz 帯の新規開発を含めたジェット噴出メカニズムにせまる独創的な研究である。

5. 必要な装置性能

「7. 補足検討資料：86GHz 帯 EAVN による M87 イメージングシミュレーション」にて詳細を検討したので、そちらを参照されたい。

6. 推進計画

● 短期 (2021 年度) :

- NRO-KVN86GHz のコミッショニング観測
- VERA 86GHz (EAVN-hi) 関連は科研費ベースで進める。
- 衛星準備関連や EHT 関連研究も科研費ベースで進める。

● 中期 (~2027 年度) :

- EAVN-hi 86GHz のコミッショニング観測開始(中期前半)
- EAVN-hi 86GHz の定常観測 (中期後半)
- EAVN-hi の科学成果を ngVLA へフィードバック

● 長期 (2028 年度以降) :

- ngEHT, ngVLA やスペース VLBI との多波長合同観測

参考文献

- [1] Wielgus, M., Akiyama, K., Blackburn, L., et al. 2020, ApJ, 901, 67.
doi:10.3847/1538-4357/abac0d
- [2] Cui, Y., et al. in preparation
- [3] Chatterjee, K., Younsi, Z., Liska, M., et al. 2020, MNRAS, 499, 362.
doi:10.1093/mnras/staa2718
- [4] Liska, M., Tchekhovskoy, A., Ingram, A., et al. 2019, MNRAS, 487, 550.
doi:10.1093/mnras/stz834
- [5] Liska, M., Hesp, C., Tchekhovskoy, A., et al. 2018, MNRAS, 474, L81.
doi:10.1093/mnrasl/slx174
- [6] McKinney, J. C., Tchekhovskoy, A., & Blandford, R. D. 2013, Science, 339, 49.
doi:10.1126/science.1230811

- [7] Hada, K., Kino, M., Doi, A., et al. 2016, ApJ, 817, 131. doi:10.3847/0004-637X/817/2/131
- [8] Park, J., Hada, K., Kino, M., et al. 2019, ApJ, 887, 147. doi:10.3847/1538-4357/ab5584
- [9] Kino, M., et al. in preparation
- [10] Takahashi, M., et al. 2021 PRD submitted

7. 補足検討資料：86GHz 帯 EAVN による M87 イメージングシミュレーション

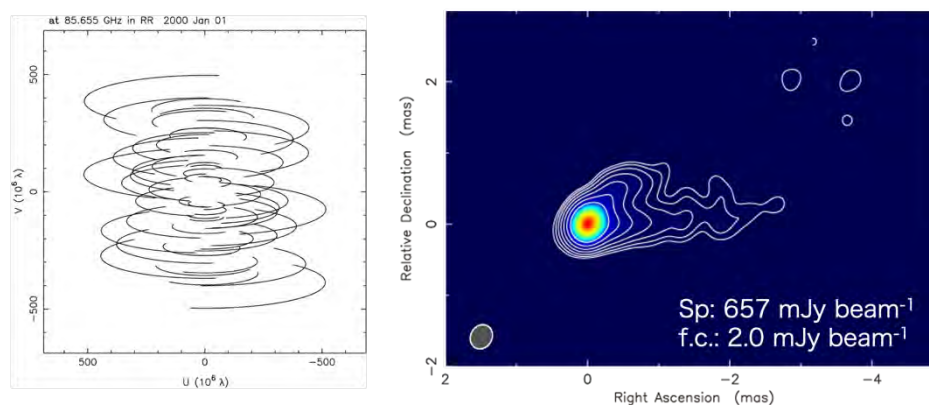
以下では様々な EA86GHz アレイを想定し、M87 のイメージングシミュレーション結果を示す。特に、EA 主要局である VERA を 86GHz 化した場合の効果について検証結果を報告する。

A) Case A: KaVA+NR045 アレイ

■ シミュレーション条件

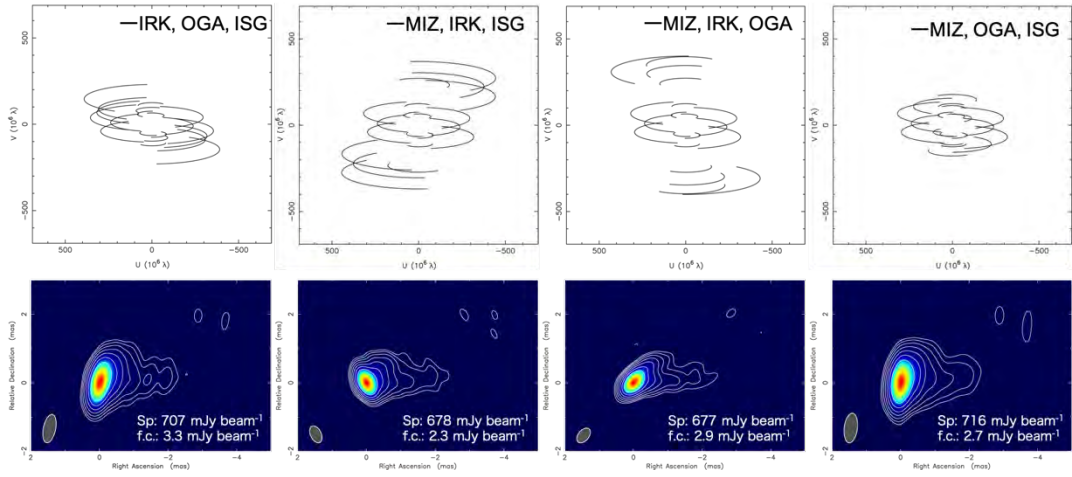
- 天体モデル：Hada et al. 2016 で得られた M87 VLBA+GBT マップ
- AIPS UVCON を用いて simulated visibility データ生成
- 10 時間の観測トラック
- T_{sys} : 150K (KVN), 200K (NR045), 200K (VERA)
- η_A (開口能率) : 0.65 (KVN), 0.5 (NR045), 0.2 (VERA)

■ 検証 1 : KaVA+NR045 フルアレイ

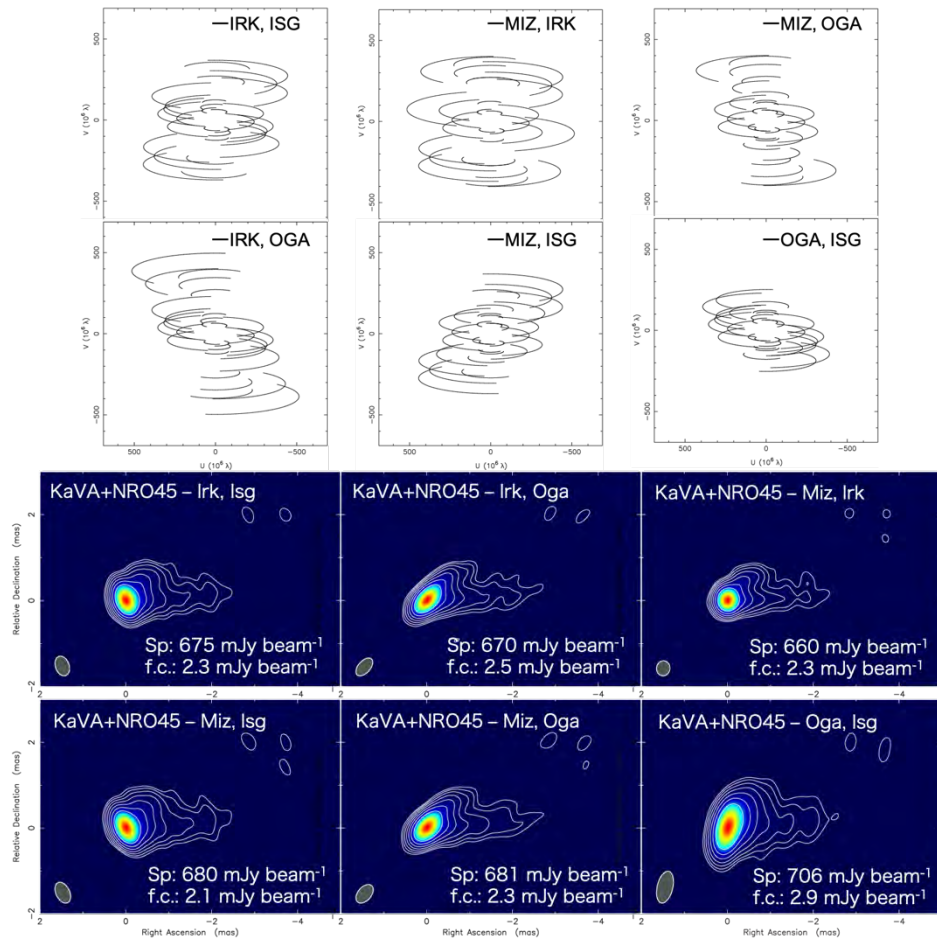


左図は uv カバレッジ、右図は CLEAN イメージング結果を示す。Sp は peak flux、f. c. はファーストコントアレベルを表す。

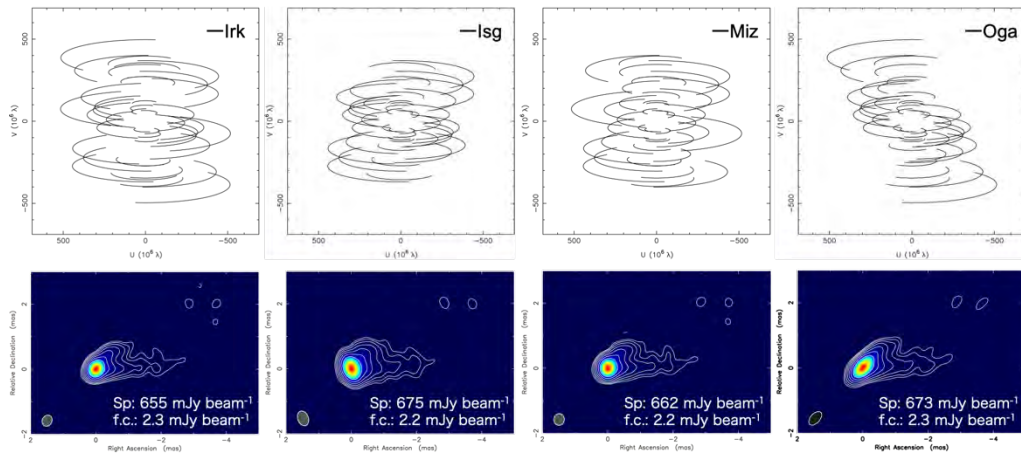
■ 検証 2 : KVN+NR045+VERA1 局



■ 検証 3 : KVN+NR045;VERA2 局



■ 検証 4 : KVN+NR045+VERA3 局



■ 考察

KaVA+NRO45 フルアレイの場合、総合的（雑音レベル、イメージ DR、空間分解能）に高いパフォーマンスを発揮する。ジェット根元のダブルリッジ構造が 0.3mas (38Rs) ~ 3mas (380Rs) スケールまでクリアにイメージされた。一方既存の KVN+NRO45 に VERA1 局のみを加えた場合、どの 1 局を加えるかで画質（特に分解能）が大幅に変化する。MIZ のみ or IRK のみ加えた場合、東西方向によく分解される一方、南北方向にビームが伸び、ダブルリッジ構造を分解するのが難しい。OGA or ISG を加えた場合、uv ホールが多少増えるが、超基線が維持されるため中心部まで比較的良好に空間分解できた。VERA2 局を加える場合、フルアレイのベストマップに最も近い画質を維持できたのが ISG+OGA であった。MIZ+IRK の場合、uv カバレッジは密だが引き続き空間分解能不足でダブルリッジ構造は分解できなかった。その他の 2 局ペアではいずれも ISG+OGA と MIZ+IRK のケースの中間であったが、ジェット根元を空間分解するためには、ISG または OGA の存在が大きく左右する。VERA3 局を追加した場合、いずれのケースも uv カバレッジ、画質ともかなり良いが、1 局だけ外して画質に最も影響が少ないのは、入来局であった。

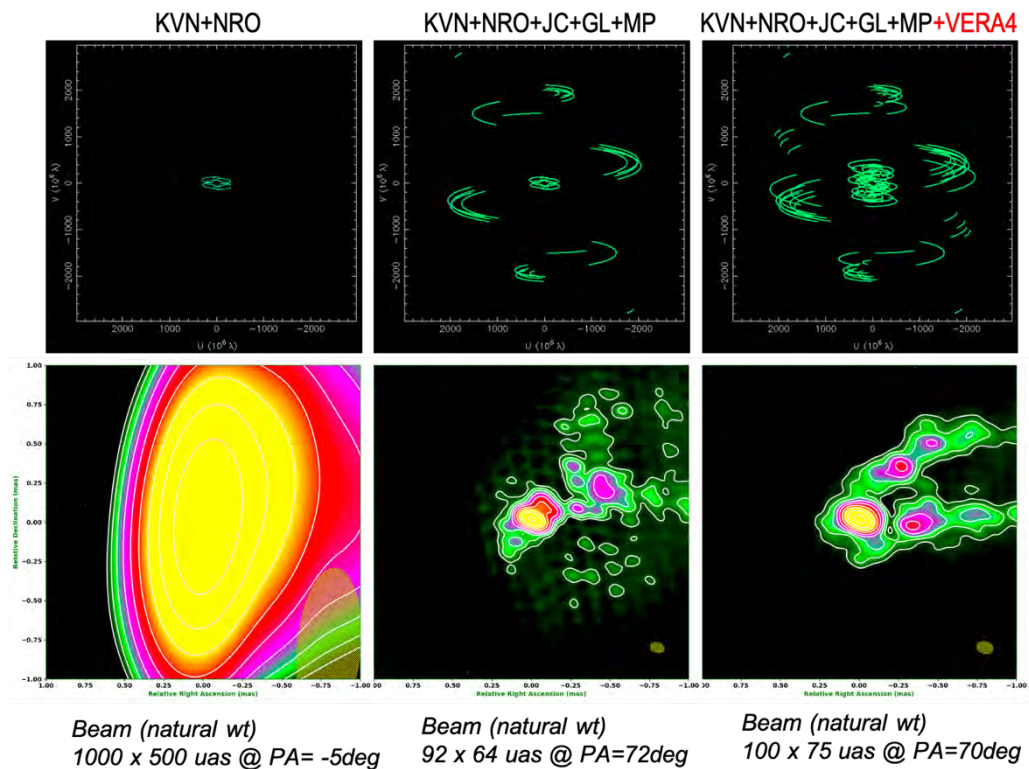
B) Case B: 拡張 EAVN アレイ

次によりグローバルなケースを考える。EA が運用する 86GHz 望遠鏡には GLT や JCMT があり、EA 周辺地域としては豪州の ATCA や Mopra が稼働中である。また e-KVN や ウルムチ QTT、タイ TNRT など新たに建設が始まる望遠鏡は 86GHz 帯も検討されている。さらには EATING VLBI で既に連携中のイタリア 3 局 (Medicina, Noto, Sardinia) も 86GHz 受信機搭載を進めている。よって今後 5 年以内には EA 地域に関連する 86GHz 情勢は大きく変化すると見込まれる。以下では、EA を中心とする 86GHz 国際 VLBI をシミュレーションし、VERA 局の有効性を検証する。

■ シミュレーション条件

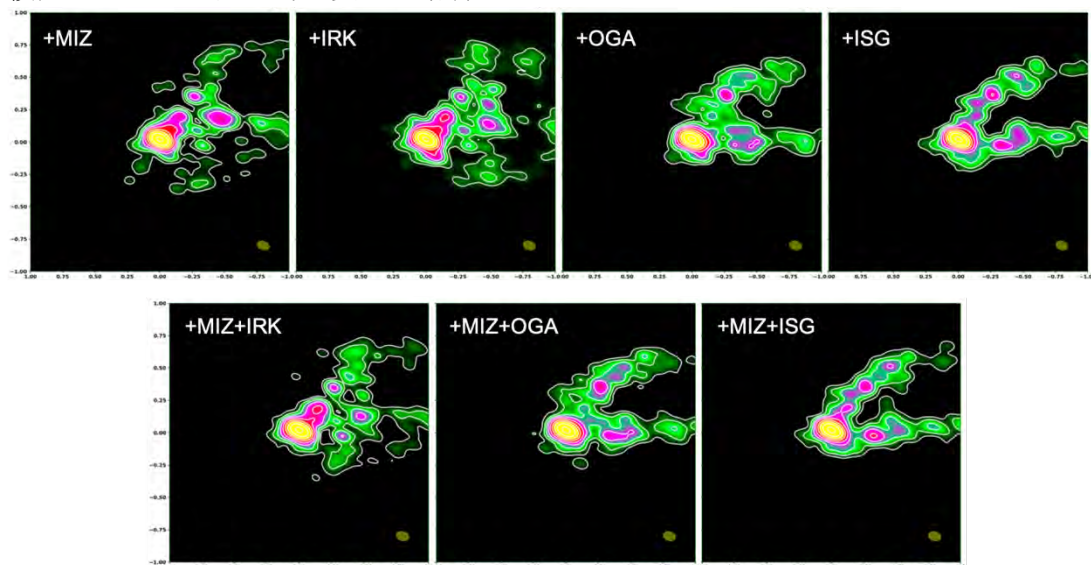
- 天体モデル：(A)に同じ
- KVN, NRO45, VERA に加え、GLT, JCMT, Mopra
- AIPS UVCON を用いて simulated visibility データ生成
- T_{sys} : 150K (KVN), 200K (NRO45, VERA), 100K (JCMT, GLT), 200K (Mopra)
- η_A (開口能率) : 0.65 (KVN), 0.5 (NRO45), 0.2 (VERA), 0.6 (JCMT, GLT), 50 (Mopra)

■ 検証 1 : VERA から 4 局参加の場合



VERA を除くアレイの場合、KVN+NRO に比べ空間分解能が大きく改善し BH シャドースケールに肉薄しているが (64uas \sim 8Rs)、非常に大きな uv ホールのためにジェットが正しく再現できなかった。一方でそこに VERA4 局を加えると高い解像度を維持したまま画質も劇的に改善した。ダブルリッジ構造の付け根とシャドーの繋がりまで明確に捉えることができることがわかった。

■ 検証 2 : VERA の参加局を変えた場合



次に VERA から 1 局 or 2 局のみ参加可能な場合、どの局の重要度が高いかを検証した。プラス 1 局の場合、MIZ or IRK では VERA なしに比べ多少の画質改善はあるものの、ジェットのダブルリッジ構造は再現できなかった。一方 OGA or ISG ではダブルリッジ構造が再現できており、特に ISG 参加の場合が最も再現性は良かった。

プラス2局の場合、MIZ+IRKでは引き続きジェットがうまく再現できなかった。一方 OGA or ISGがあれば、ジェットは良く再現できている。これは ISG or OGA(特に ISG)が、国際アレイの中で uv ギャップを一番効果的に埋める場所に位置するためと考えられる。

■ 考察

KVN+NRO+JCMT+GLT+Mopra の場合、ジェットの構造を気にせずシャドースケールの空間分解だけであれば VERA なしでも実施可能だろう。しかし、VERA が加わることで画質が劇的に改善し、ジェットとシャドーの繋がりまで正確に撮影可能になることがわかった。GMVA+ALMA は更に解像度や感度が良いが、基本的に年1回の観測しかできない。そこで VERA を含む今回のアレイで機動性を活かして10-20倍の時間分解能でモニター観測することができれば、ジェットの初速度・初期加速度の測定や、ダブルリッジの輝度比からジェットの回転方向やBH スピンなどの制限まで実現できる可能性が十分にある、大変ユニークなアレイになるだろう。

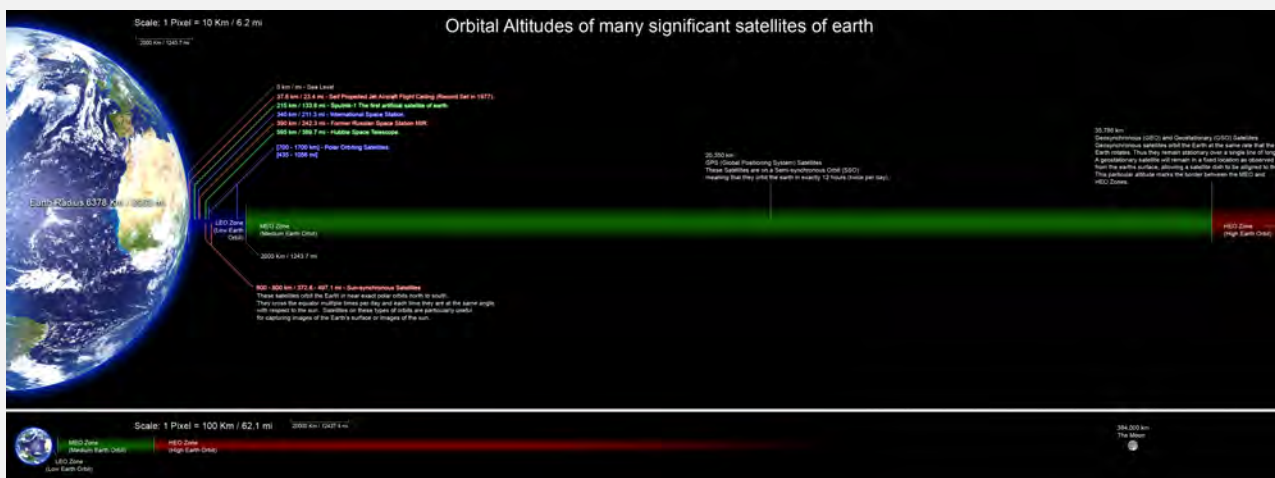
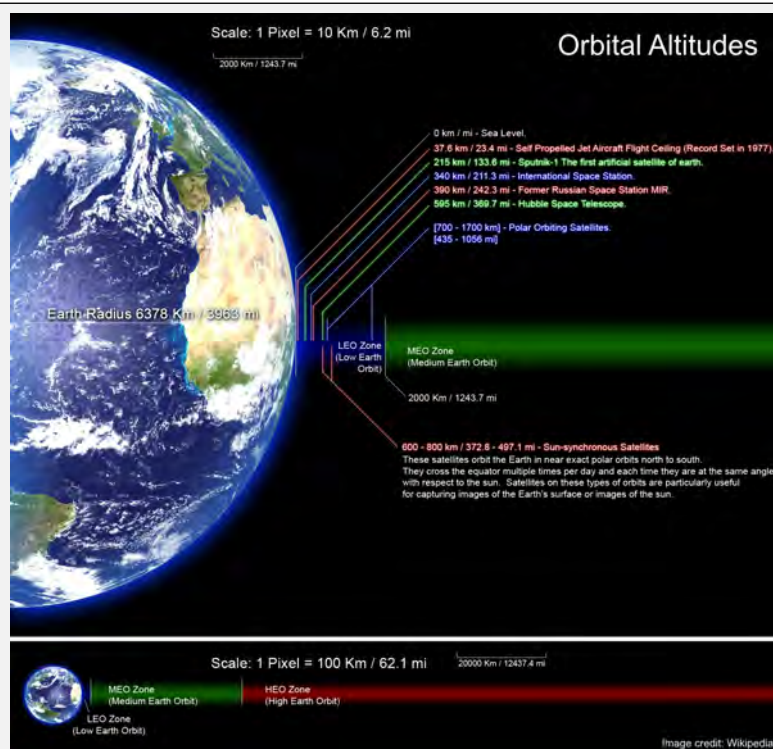
VERA から一部参加の場合、最も効果的と考えられるのは石垣局であった。一方水沢・入来局は多少画質を改善するが、M87 ジェットの構造を精度良く再現することは難しかった。観測条件や搭載作業など現実的な観点では水沢・入来のほうが条件が良く、石垣・小笠原はよりチャレンジングである。VERA86GHz 化を実施する場合、サイエンスインパクトとプラクティカルな側面をどう折り合いをつけていくか、今後の検討課題である。

「スペースVLBIで探るBHシャドウ微細構造」

紀 基樹 (工学院大), 土居 明広 (JAXA/ISAS), 秦 和弘 (NAOJ)

1. 研究の意義・背景

EHTコラボレーションによる2019年4月のM87のブラックホールシャドウとそれを縁取るフォトンリングの画像と論文の発表以降、ブラックホールに関する研究が急速に進展している。基礎物理学としての「一般相対性理論のテスト」および、天文学としての「ブラックホールスピンの測定」および「ジェット噴出メカニズムの解明」を主要目標に掲げて、より大きなアレイ、より高い周波数、より長い基線を持つサブミリ波VLBI観測による、より鮮明(=高分解能)でより高感度な画像の取得に向けた検討も精力的に進められている ([1], [2])。サブミリ波スペースVLBIもこの潮流のひとつに位置付けられる。



参考：軌道高度の模式図 (Wikipediaより)

サブミリ波スペースVLBIで探るBHシャドウ，フォトンリング周辺の微細構造についての主なサイエンスケースを以下に挙げる。（関連研究を網羅はしていない。）

[1] 「一般相対性理論のテスト」

手法：「フォトンリング」自体を構成している「サブリング」を空間分解する

EHTで観測した画像は、完全には空間分解しきれていない「フォトンリング」である。一般相対性理論に基づくと、この「フォトンリング」はブラックホール周りを回る光子の数でインデックスされた「サブリング」が無限に連なったものと考えられる。これらの「サブリング」は長基線上に強く普遍的なフーリエ成分を生成する (図1)。その長基線成分の観測を通じて一般相対性理論をテストする ([3])。

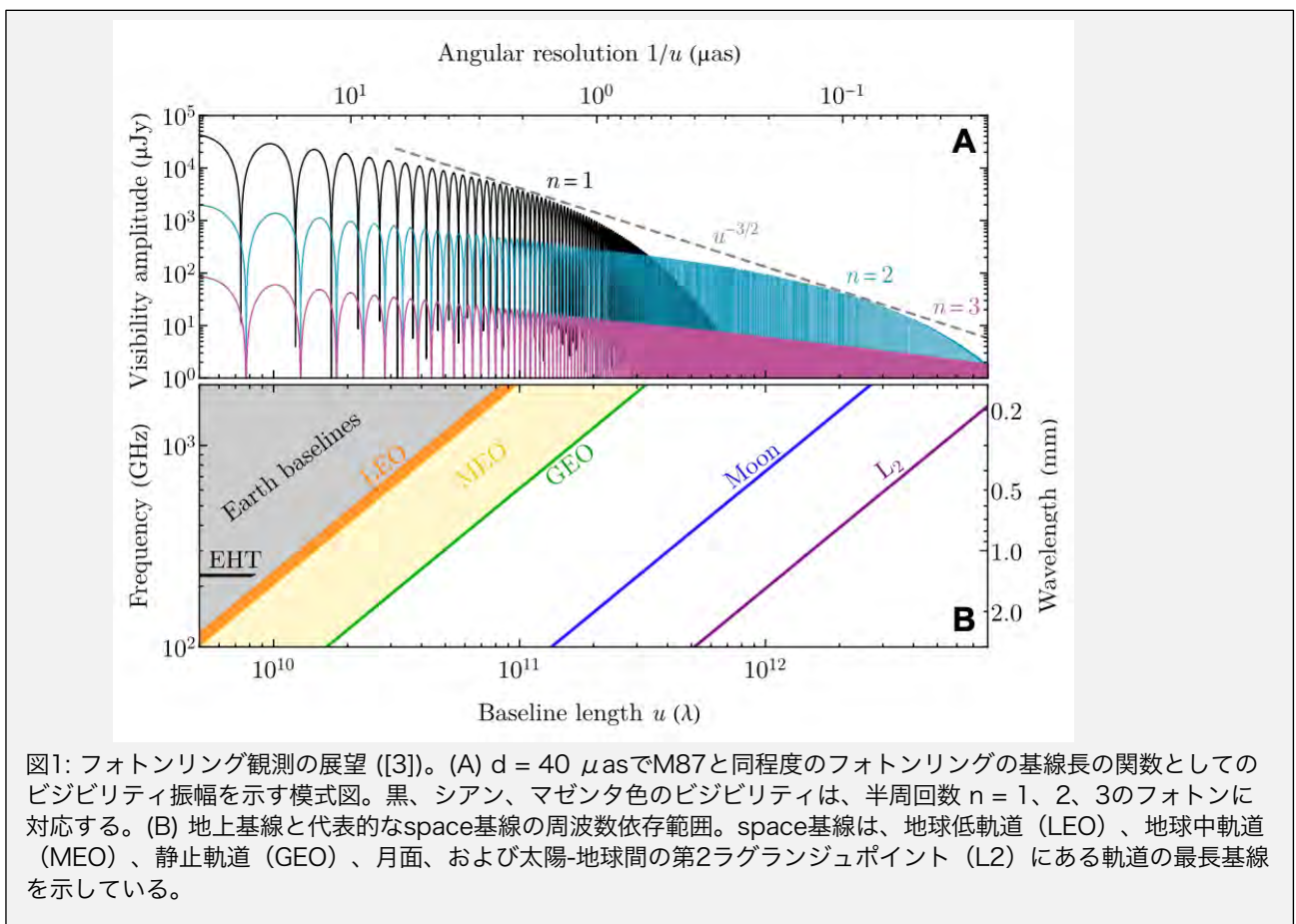


図1: フォトンリング観測の展望 ([3])。 (A) $d = 40 \mu as$ でM87と同程度のフォトンリングの基線長の関数としてのビジビリティ振幅を示す模式図。黒、シアン、マゼンタ色のビジビリティは、半周回数 $n = 1, 2, 3$ のフォトンに対応する。 (B) 地上基線と代表的なspace基線の周波数依存範囲。space基線は、地球低軌道 (LEO)、地球中軌道 (MEO)、静止軌道 (GEO)、月面、および太陽-地球間の第2ラグランジュポイント (L2) にある軌道の最長基線を示している。

[2] 「BHスピンの測定」

手法：「フォトンリング」周辺の特徴的構造「三日月影」を空間分解する

EHTで観測したM87フォトンリングの直径からM87のブラックホールの質量に強い制限がついた一方、BHスピンについてはベクトルの向きを決めるにとどまった。そこで、BHスピンベクトルの大きさを決めるため、2017年4月時は暗く見えていなかったが質量降着量

が多めのときに「フォトンリング」近傍に出現が予言される、ブラックホール降着流からの放射による「最内安定円軌道 (ISCO) リング」に注目した。BHのスピンの値が大きい場合は「ISCOリング」と「フォトンリング」の中心位置にずれが生じ、両リングの間隙に特徴的な影構造「三日月影」が発生する(図2)。「三日月影」の横幅を計測して、BHスピンの大きさを制限する([4])。

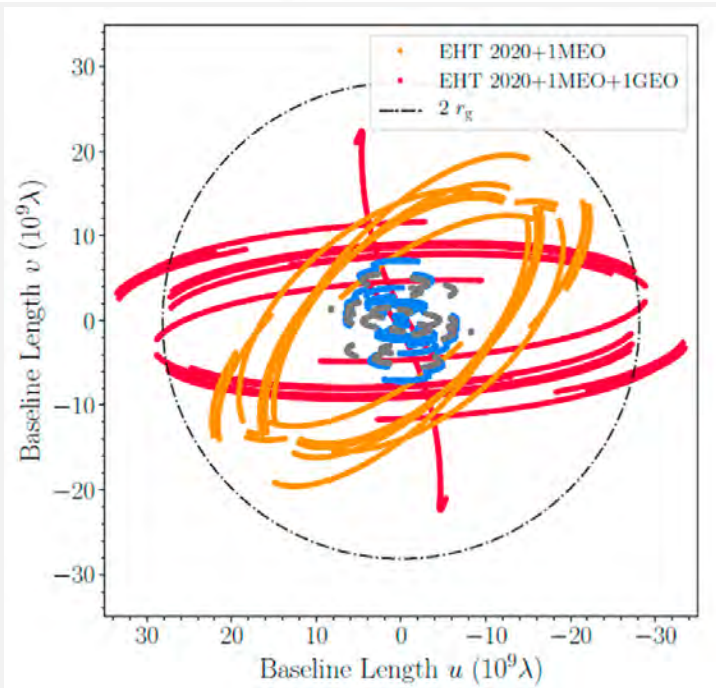
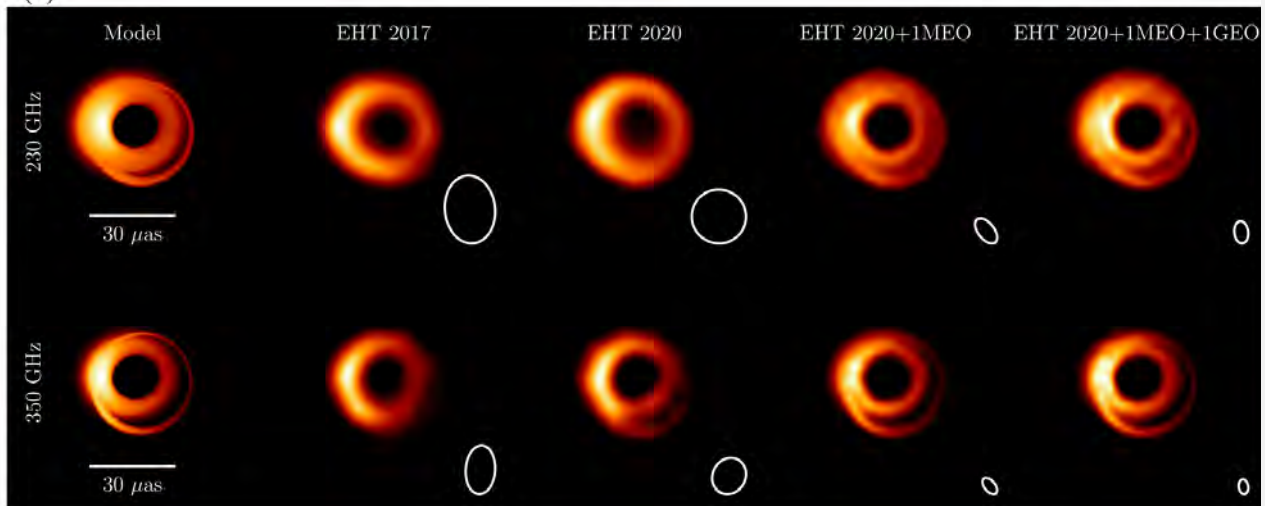


図2: 上: M87の三日月影モデルの数値シミュレーション画像の再構成 ([4])。カラースケールはリニア。各パネルの白い楕円は、一様に重み付けされた合成ビームのFWHMサイズを示している。 下: MEO(オレンジ)軌道およびGEO(赤)軌道のスペース局を追加したEHTアレイのuv-coverage。破線は $2r_g$ の場合のフリッジ間隔を示す。

「ジェット噴出機構の解明」

手法：「フォトンリング」周辺の特徴的構造「よどみリング」を空間分解する

ジェットファンネル内のよどみ面底で生成注入されている可能性のある電子陽電子プラズマからの放射について調べた。その結果、よどみリング放射が直接届く「よどみ直接リング」と、BH重力による強く曲げられてから届く「よどみ準フォトンリング」が、アプローチジェットとカウンタージェットのそれぞれで2つずつ形成され、計4つのリングが形成される(図3)。2017年のEHT観測とよどみリングモデルの整合性について調べると、BHスピンの場合が $a=0.99$ の場合はカウンタージェットからの「よどみ準フォトンリング」の「よどみ直接リング」がほぼ $40\mu\text{as}$ になっており、またアプローチジェットは暗いため、EHT2017のM87*で観測と無矛盾であった ([5])。広いパラメータスペースにおける一例に過ぎないが、スペースVLBIで「よどみリング」の空間分解しジェットへの物質注入を探ることは、ジェット形成機構を探る強力な研究手法となる。

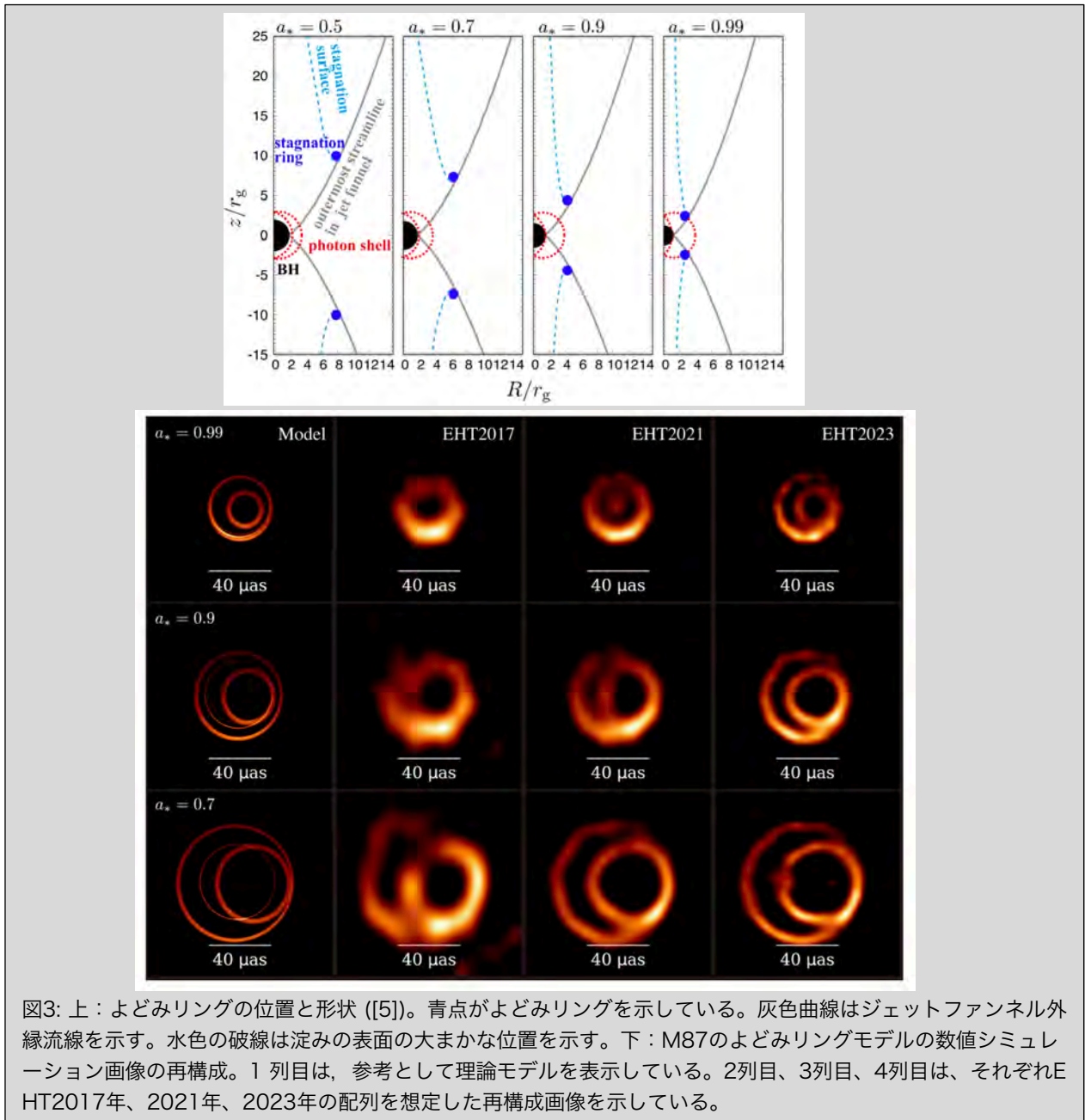


図3: 上：よどみリングの位置と形状 ([5])。青点がよどみリングを示している。灰色曲線はジェットファンネル外縁流線を示す。水色の破線は淀みの表面の大まかな位置を示す。下：M87のよどみリングモデルの数値シミュレーション画像の再構成。1列目は、参考として理論モデルを表示している。2列目、3列目、4列目は、それぞれEHT2017年、2021年、2023年の配列を想定した再構成画像を示している。

2. 何をどこまで明らかにするか

- 本計画では、Sgr A* (LEO) については議論せず、M87 (MEO以上) を主要なサイエンスケースと位置付けて議論する。
- 上で紹介した「一般相対性理論のテスト」は、月面・L2高度を要求する。これはコスト・技術的面でハードルが高いため、ここではひとまず議論をしない。

以上に基づいて、以下に「何をどこまで明らかにするか？」を簡潔にまとめる。

- M87「三日月影」の横幅を空間分解し、BHスピン値に制限をつける
 - $10\mu\text{as}$ の空間分解能
 - ngEHTによる感度向上でISCOリングの検出が期待できる
- M87「よどみリング」の空間分解し、「ジェットへの物質注入」の場所を探る

3. 期待される学術的インパクト

- ブラックホールスピンの測定
- 降着円盤最内縁の直接撮像
- ジェット噴出メカニズム解明に向けた理解の深化

4. 新規性・独創性・他コミュニティ（理論・多波長・国内外等）との連携

- 電波天文学から基礎物理学のテスト ⇒ 一般相対性理論のテスト
- 天体物理学における未解決問題の解明 ⇒ 宇宙ジェットの形成機構

5. 必要な装置性能

周波数、時間分解能、周波数分解能、視野等

- 望遠鏡：space局 + ngEHT
- 周波数：230/345 GHz
 - 地上ngEHTと共通の周波数帯
 - 350GHzより上を目指す動機は弱い。対応する地上VLBIアレイも無い。この周波数帯において空間分解能を上げる唯一の手段が space VLBIが必須。
- 空間分解能： $10\mu\text{as}$ (18000km@350GHz)
 - GEOもしくはHEO
- 基線感度：~100mJy
 - 「フォトンリング」「ISCOリング」「よどみリング」が同程度フラックスを想定

6. 推進計画

- 短期(~2022/3)
 - JAXA Research Group study
 - EHTCを通じてのngEHTへの参加
- 中期(~2027年度)・

- PrePhase-A EHTCを通じてのngEHTへの参加
- Phase-A/プロジェクト化 EHTCを通じてのngEHTへの参加
- 長期(2028年度以降)
- Phase-B～ EHTCを通じてのngEHTへの参加

7. 参考文献

- [1] Doleman, S., Blackburn, L., Dexter, J., et al. 2019, in Bulletin of the American Astronomical Society,
- [2] Fish, V.-L., Shea, M., \& Akiyama, K.\ 2020, Advances in Space Research, 65, 8 21. [doi:10.1016/j.asr.2019.03.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.029)
- [3] Johnson, M. D., Lupsasca, A., Strominger, A., et al. 2020, Science Advances, 6, eaaz1310, [doi: 10.1126/sciadv.aaz1310](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz1310)
- [4] Kawashima, T., Kino, M., \& Akiyama, K.\ 2019, ApJ, 878, 27. [doi:10.3847/1538-4357/ab19c0](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab19c0)
- [5] Kawashima, T., Toma, K., Kino, M., et al.\ 2021, ApJ, 909, 168. [doi:10.3847/1538-4357/abd5bb](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abd5bb)

AGN トーラスの最内縁部の探査

永井 洋 (国立天文台/総研大)

1. 背景

活動銀河核 (AGN) の統一モデルは、観測的特徴の多様性を説明するために導入された概念で、AGN は「中心核を見込む角度」、「質量降着率」、「ジェットの卓越度」でパラメーター化できるというアイデアだ。AGN の周辺には、トーラスと呼ばれる、幾何学的に厚い円環状の構造体があるとされ、それが中心核を部分的に遮蔽するために、中心核を見込む角度によって観測的特徴に違いが現れる。このトーラスが実在するかは長い間議論になってきた。近年、アルマ望遠鏡による高分解能分子輝線観測や、10m 級赤外線望遠鏡・赤外線干渉計によって、AGN 周辺の 1-10 pc スケールにおける分子ガスやダストの分布・性質が明らかになってきた (e.g., Tristram et al. 2014; Imanishi et al. 2018; Izumi et al. 2018; Impellizzeri et al. 2019)。これらの観測から、中心核周辺には、確かにトーラスに似た構造体があるものの、実際にはその形状は複雑で、相 (warm gas or cold gas, atomic gas or molecular gas or dust) によっても構造が異なり、かつ力学的に安定した構造ではないことが示唆されている。数値実験でも、トーラスは静的な構造体ではなく、AGN からの輻射圧を受けて生じるアウトフローの一部ではないかという指摘もあり (e.g., Wada 2016)、トーラスの理解に新しい展開がもたらされている。

2. VLBI 観測で迫るトーラス最内縁部とその学術的重要性

VLBI 観測では、トーラスに関連する構造を直接見ることは難しいものの、明るい AGN を背景光とした吸収線により、トーラスの内縁部 (subpc スケール) のガスの分布や運動を明らかにした例がある。Sawada-Satoh et al. 2016, 2019 は、KVN の 3mm 帯の観測で、NGC 1052 中心核付近の HCN(1-0)、HCO+(1-0)の吸収線を観測した。この天体では、以前から、自由自由吸収を使ってプラズマ円盤が同定されており、トーラスの電離した領域が吸収を起こしているという説が提案されていた (Kameno et al. 2002)。プラズマ円盤が観測されている領域に沿って分子吸収線が観測されたことから、吸収線はトーラスの内縁部に起因していると考えられる。VLBI の高い解像度により、吸収オパシティが非一様、かつ、吸収体の速度構造はインフローとアウトフローが混在、もしくは乱流状態にあることが示された。今のところ、VLBI は subpc スケールを直接探ることができる唯一の装置であり、他の波長の望遠鏡の解像度を凌駕している。今後、VLBI の能力を活かして系統的な研究を行うことで、独自性の高い成果をあげることができるだろう。

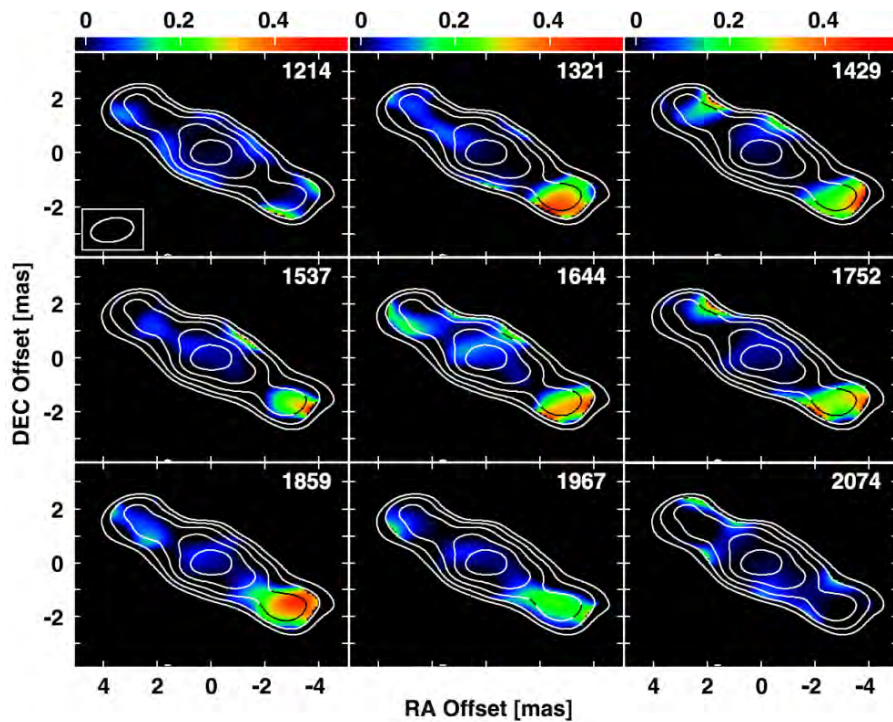


図 1 : NGC 1052 の電波連続波強度図 (等高線) と HCO+(1-0)吸収線のオパシティ分布 (カラー) (Sawada-Satoh et al. 2019)。電波連続波はジェットからの放射で、中心の最も明るい部分がコアで、そこから北東-南西方向にジェットが観測されている。各パネルの右上の数値は相対速度を表す (系の速度中心は 1507 km s^{-1})。

3. 必要な観測性能

AGN の核周領域では、星間空間で一般的に観測される CO の他に、高密度ガスのトレーサーである HCN、HCO+分子輝線もしばしば観測される。HCN、HCO+分子の $J=1-0$ 遷移輝線は、波長 3mm 帯で観測することができる。すでに KVN で観測することができるものの、観測局数の向上が望まれる。4 局以上が参加することで、振幅のセルフキャリブレーションが可能となり、画質の向上が見込まれる。また、数千 km の基線長が加わることで、KVN 単独 (3mm 帯で 1 ミリ秒角の分解能) では空間分解が難しい天体も観測対象になる。例えば、VERA 水沢局が観測に参加すると、100 Mpc の距離にある天体を 0.1 pc の空間スケールで解像することが可能となる。表 1 に示す天体が、これまで自由自由吸収によるプラズマ円盤が確認されている天体や、アルマで明確なトーラス上構造が確認されている NGC 1068 など、吸収線観測の候補天体となる。NGC 1052, NGC 1275 を除くと、256 MHz 帯域ではFRINGE検出は難しく、広帯域化や集光力の高い野辺山の参画が期待される。今後、アルマによる観測が進むことで得られる知見次第では、対象となる候補天体の数も増えることが予想される。

天体名	距離 [Mpc]	予想相関強度 [Jy]	予想相関強度についての補足
NGC 1052	20	0.3	43 GHz の値 (2008ApJ...680..191S)
NGC 4261	31	0.07	43 GHz の値 (2015ApJ...807...15H)
Mrk 348	65	0.08	43 GHz の値 (2010AJ....139.1695L)
NGC 1068	16	0.01	8 GHz の値 (2004ApJ...613..794G)
NGC 1275	70	>1	

表 1 : 候補天体

4. 推進計画

短期 (2021 年～) すでに実績がある NGC 1052 に加え、最も明るい NGC 1275 を対象に KVN を使った研究を進める。

中期 (2025 年～) VERA の 86 GHz 化によって NGC 1275 の高解像度 (~0.1 pc スケールを解像する) 観測を行う。広帯域化の実現によって、高解像度の観測、NGC 4261, Mrk 348, NGC 1068 の観測を行う。

長期 (2030 年～) ngVLA などの将来計画に引継ぎ、研究を発展させる。

ブレーザージェットの高エネルギー放射領域の直接解像・時間領域・マルチメッセンジャー天文学

新沼浩太郎

1. 研究の意義・背景

超高エネルギーガンマ線の観測的研究の進展により、活動銀河中心核ジェットの中でも特に多数のブレーザーが数百GeVからTeVのエネルギー領域で検出されるようになってきた(The Cherenkov Telescope Array Consortium 2019)。また近年、アイスキューブニュートリノ望遠鏡の稼働によりこれらブレーザージェットから高エネルギー宇宙線を介して生成される高エネルギーニュートリノ放射も確認されるようになってきた(IceCube Collaboration 2018)。これらの成果によりブレーザージェットの高エネルギー放射領域が高エネルギー宇宙線の加速源である可能性も示唆されるようになってきた。したがって、ブレーザージェットの高エネルギーガンマ線放射・高エネルギーニュートリノ放射の起源および放射領域を明らかにすることが、物理学にとっての最重要課題でもある宇宙線加速の起源を明らかにするもつながらる可能性がある。しかしながら、高エネルギーガンマ線観測装置やニュートリノ望遠鏡の空間分解能の不十分さなどにより、その起源および放射領域の完全に特定するには至っていない。

理論的に予想される高エネルギー放射領域あるいは放射体の空間スケールに迫ることができる唯一の観測装置であるVLBIを用いた観測的研究(図1)は、同領域および起源の特定に重要な役割を担うことが期待されている(e.g., Acciari et al. 2009)。

天体によってはAGN中心 10^4 シュバルツシルト半径を切る空間スケールを撮像可能な86GHz帯の東アジア地域のVLBI観測網を用いたモニターと、 ~ 10 pc程度まで空間分解能は落ちるものの、機動性が高く高感度な国内VLBI(および干渉計)を用いた強度の高頻度モニターを中心に実施し、

1. ジェット高エネ放射領域の制限(VLBI領域とVHE放射領域は一致しているか?)
2. 高エネルギーニュートリノ放射を伴うブレーザーと他の高エネルギー放射のみを伴うブレーザーでは何が違うのか?

について、系統的な調査を行う必要がある。

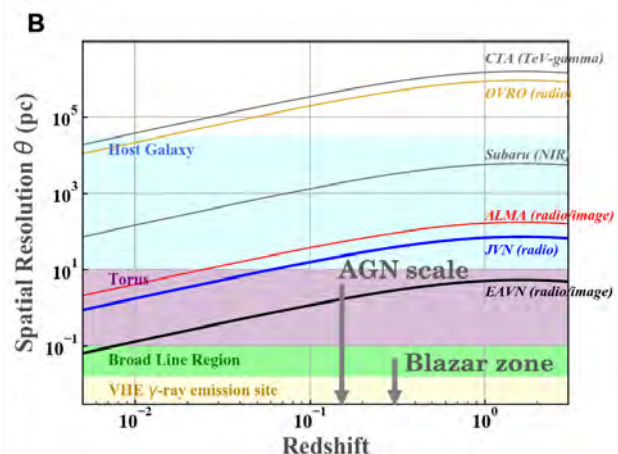
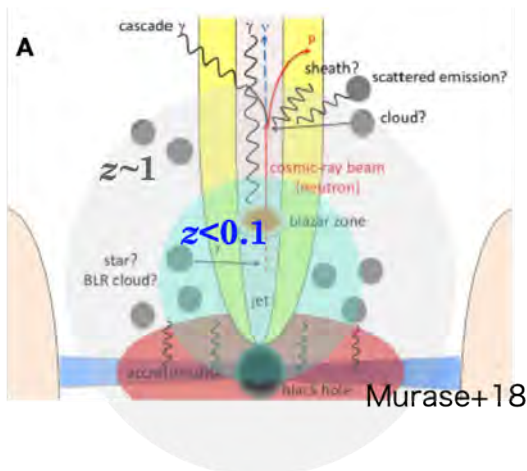


図1. 東アジア86GHz VLBIで期待される空間分解能とブレーザーの中心領域の空間スケールとの関係(A, 赤方偏移0.1および1の場合)と、天文観測装置ごとの空間分解能と赤方偏移の関係(B). A, Bどちらも1億太陽質量の巨大ブラックホールに対するスケールで検討している.

2. 何をどこまで明らかにするか

- 国内VLBI観測網を中心に、CTAでモニター予定あるいはJVNによるサーベイ観測で新たに見つかった超高エネルギーガンマ線ブレーザー候補天体の定期的なモニター観測を実施する(平均的に隔週以下程度での強度モニター、月1程度の撮像モニター(可能であれば偏波情報)): 10-20天体程度から
- 国内VLBI観測網を中心に、高エネルギーニュートリノイベント発生後の他波長観測と比較可能な時間分解能の光度曲線の取得およびアイスキューブ望遠鏡がもっとも感度を有する領域における暗いブレーザー(他の望遠鏡でモニターされていない)の強度モニター: 10-20天体程度から
- 近傍超高エネルギーブレーザーおよび高エネルギーニュートリノブレーザー(イベント発生後、国内VLBIによるモニターや他波長観測で対応天体が絞り込めたもの)に対し、東アジア86GHz VLBIによる 10^4 シュバルツシルト半径を切る領域の構造を2~3ヶ月に1回程度の頻度で撮像モニター: 年間3~5天体程度

上記のVLBIを用いた観測的研究をもとに、VLBIスケールの強度変動および3mm-VLBIによるジェット最上流領域の構造変動を基軸としたマルチメッセンジャー天文学により、ブレーザーにおける高エネニュートリノ生成領域と高エネルギー放射領域の関係の有無について明らかにする

3. 期待される学術的インパクト

ブレーザー・ジェットの超高エネルギーガンマ線放射・高エネルギーニュートリノ放射の起源および放射領域を明らかにすることが、物理学にとっての最重要課題でもある宇宙線加速の起源を明らかにするもつながらる可能性がある。

4. 新規性・独創性・他コミュニティ(理論・多波長・国内外等)との連携

- 理論研究および高エネルギー電磁波帯観測で予想される高エネルギー粒子や高エネルギー宇宙線の生成領域は唯一VLBIのみが到達可能な空間スケールであるため、マルチメッセンジャー天文学におけるVLBI観測データの活用が期待される
- 超高エネルギーガンマ線などの高エネルギー電磁波帯における振る舞いおよび高エネルギー ν 放射の振る舞いと、VLBIスケールにおける時変動の比較を行うことが重要

5. 必要な装置性能

- ある程度遠方におけるブレーザーにおいても検出可能な感度(図2)
- VLBIスケール(空間スケール)での時間領域探査の推進(JVNおよび大学電波干渉計を中心とした追観測とモニター観測が極めて重要)

- 86GHz帯東アジアVLBI観測網の確立により、角度分解能0.1masでの撮像モニター体制の構築

6. 推進計画

自由形式. おおまかには短期(~2022/3)・中期(~2027年度)・長期(2028年度以降)

- 2024

- EAVN86GHzによる撮像観測 (commissioning、対象: Mrk421/Mrk501 + TXS 0506)
- 山口干渉計/JVNIによるモニター (ToO) 継続 (CTAブレーザー/ ν ブレーザー候補のモニター、ToO観測)
- EAVN K/Q, VERA43G dual-polモニター検討・開始 (対象: Mrk421/Mrk501、 ν ブレーザー数天体)

-2027

- EAVN86GHzによる撮像モニター (近傍TeVブレーザー5天体 + ν ブレーザー (TXS 0506他))
- 山口干渉計/JVNIによるモニター (ToO) 継続 (CTAブレーザー/ ν ブレーザー候補のモニター、ToO観測)
- EAVN K/Q, VERA43G dual-polモニター継続 (Mrk421/Mrk501を含む10天体程度 + ν ブレーザー)
- 2023より本格稼働中のCTAとコヒーレントな観測を計画・実行

2028 -

- 稼働中のCTAおよびGen2に向けアップグレードが進行しているIceCube (2030年代) を意識したVLBIによる時間領域・マルチメッセンジャー体制の確立
- 国内・東アジアの高感度VLBI観測体制によるモニターおよび追観測の定常化
- 次世代の高感度・高分解能ミリ波撮像アレイ (EAVN-high / SKA-hi / ngVLA) による追観測の定常化

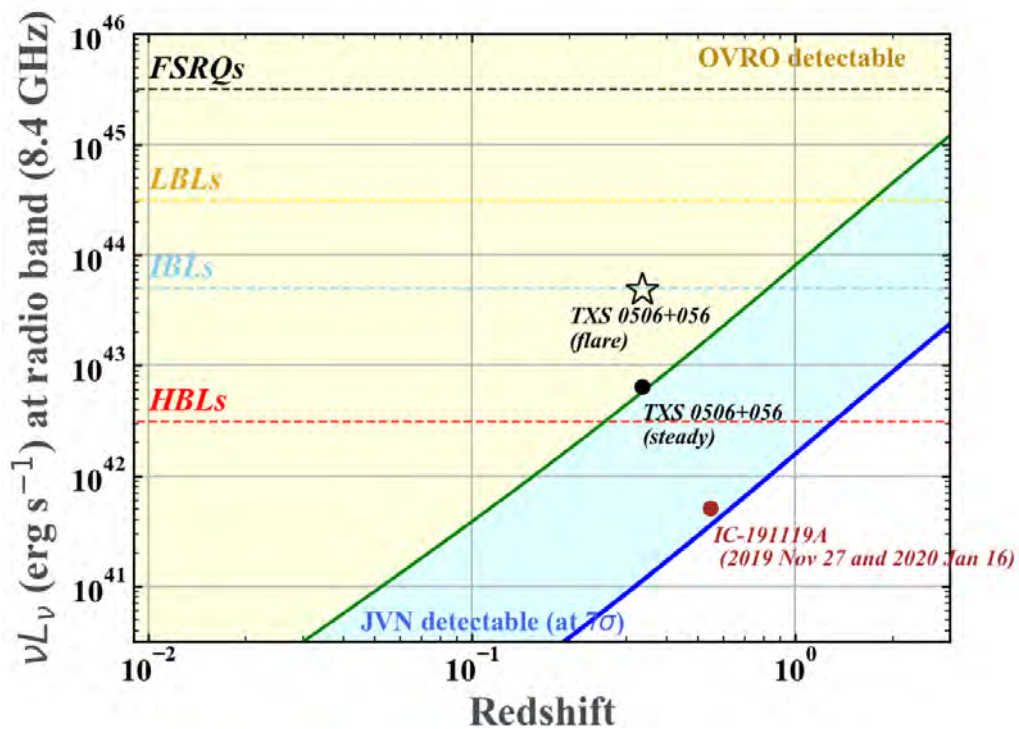


図2. ブレーザーの高頻度モニターを実現しているOVROプロジェクトと同様のモニターを実現出来る可能性がある国内VLBI(JVN)の感度を比較した図。ブレーザーの種族ごとに期待される電波光度をどの赤方偏移まで検出可能であるかを示している。JVNであればおよそ2桁近く高い感度でモニターを実施できることが期待できる。

参考文献

1. Cherenkov Telescope Array Consortium, Acharya, B. S., Agudo, I., et al., 2019, "Science with the Cherenkov Telescope Array". Edited by CTA Consortium. Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., . ISBN: 9789813270091. doi:10.1142/10986
2. IceCube Collaboration, Aartsen, M. G., Ackermann, M., et al. 2018, Science, 361, 147. doi:10.1126/science.aat2890
3. Acciari, V. A., Aliu, E., Arlen, T., et al. 2009, Science, 325, 444. doi:10.1126/science.1175406

AGN-Starburst Connection

永井 洋 (国立天文台/総研大)

1. 研究背景

活動銀河核 (AGN) の降着流は、AGN の活動性を決定づける重要な指標である。近年、ALMA 望遠鏡によって、1-100 pc スケールの核周領域におけるガス円盤 (circumnuclear disk: 以降 CND) の詳細な構造・運動、さらには AGN の統一モデルでその存在が提唱されてきた「トーラス」と思われる構造が分解される (Imanishi et al. 2018; Combes et al. 2019) など、降着流を構成する様々な要素の性質が明らかにされつつある。核周領域の高密度分子ガスの質量と AGN の光度の間には相関関係があることが明らかにされ (Izumi et al. 2016)、この領域における分子ガス量が AGN の活動性を決める本質的な要因であることが示唆されている。

一方で、核周領域から降着円盤スケールにまでガスを落とすための角運動量輸送の原因は、観測的にはあまりよくわかっていない。理論的には、CND・トーラスにおける超新星爆発によって乱流を駆動し、角運動量を輸送する可能性が提唱されている (SN 駆動乱流モデル: Kawakatu & Wada 2008) が、この空間スケールにおける星形成・超新星爆発の兆候を分解撮像した例は限定的である。

最近になり、この状況を変える新しい観測例が報告された。Nagai et al. (2021)は、近傍の電波銀河 NGC 1275 の ALMA による観測によって、10-100pc スケールの分子ガス CND を解像した。さらに 330MHz 帯の VLBI 観測データから、CND に付随したシンクロトロン放射を検出することに成功した。このシンクロトロン放射は超新星爆発による放射と考えられ、CND における星形成活動の痕跡を撮像した初めての例である。測定されたフラックスから、CND における星形成率は $3 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ と見積もられる。また、CND のガスの速度分散等の観測的特徴は、SN 駆動乱流モデルで予想されるものと整合的であることも明らかになった。今後、より多くの天体で同様の観測を行うことで、CND における超新星爆発が与える角運動量輸送への影響の詳細を評価できると期待される。したがって、ALMA で観測された近傍 AGN の CND を、VLBI 観測によって観測することの重要性が、今後ますます高まってくる。

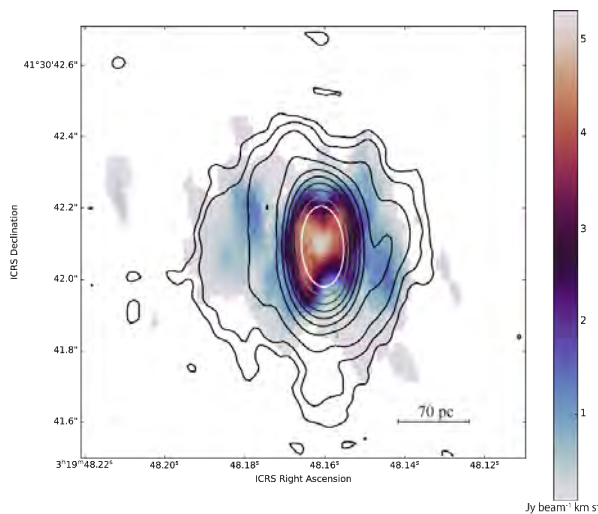


図 1 : NGC 1275 の一酸化炭素 (J=2-1) 輝線の積分強度図 (カラー) と 330 MHz 連続波 (等高線) (Nagai et al. 2021)。一酸化炭素輝線は CND からの放射で、それと分布が一致するように、330 MHz 連続波が分布している。330 MHz 連続波は CND で形成された大質量星が超新星爆発を起こすことで放射されている。

2. 学術的重要性

光度が異なる複数の AGN に対して、同様の研究を行うことにより、CND における星形成率と AGN 光度の関係を定めることができる。これにより、SN 駆動乱流と角運動量輸送の関係を探ることが可能だ。AGN に供給される物質の角運動量輸送は長年の課題であり、本研究は、この問題に極めて独自性の高い手法で迫るものである。

一般に星形成の痕跡を探る指標はいくつもの方法が提案されている。たとえば、星形成活動によって温められたダストからの熱放射 (連続波) あるいは多環芳香族炭化水素 (PAH) を赤外線で観測する、自由自由放射を観測する、大質量星周辺の再結合線を探るなどの方法が考えられる。赤外線連続波や PAH は、10m 級の近赤外線望遠鏡 (補償光学付き) で達成できる可能性があるものの、これまで分解撮像された例はない。自由自由放射や再結合線は ALMA を使ったミリ波・サブミリ波帯で観測の可能性があるが、典型的な ALMA 観測のダイナミックレンジ (100-1000 程度) では、明るい AGN からの放射との区別が難しい。一方で、VLBI の場合、NGC 1275 の例のように、既存の VLBA で観測実績があるように、現実的な観測手法である。現時点では、AGN 近傍の星形成の痕跡を探る最良の方法であり、他の観測手法に対して独自性を発揮できる。下記に述べる観測性能を満たすことで、EAVN でも実現が可能である。将来的には FAST などの大口径望遠鏡が加わることにより、VLBA よりも高いイメージング感度を達成することができるだろう。

3. 必要な観測性能

超新星爆発による電波放射強度 (F) と星形成率 (SFR) の関係は以下の式で与えられる (Condon 1992)。

$$\left(\frac{F}{\text{Jy}}\right) \sim 0.44 \times \left(\frac{D}{[10 \text{ Mpc}]}\right)^{-2} \left(\frac{\nu}{[\text{GHz}]}\right)^{-\alpha} \left(\frac{\text{SFR}}{M_{\odot} \text{ yr}^{-1}}\right)$$

ここで、 D は天体までの距離、 ν は観測周波数である。距離 10 Mpc にある天体を 1 GHz

で観測したとして、CNDにおける星形成率（SFR）が $1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ だった場合、期待される電波強度は 440 mJy となる。これをビーム 10 個分で解像したとすると、1 ビームあたりの電波強度は 44 mJy beam^{-1} と見積もられる。十分な SN（例えば、SN=10）で検出するためには、 mJy オーダーの感度が必要となる。この数字自体は既存の VLBI でも十分達成可能ではあるものの、明るい AGN（ $\sim \text{Jy}$ オーダー）からの放射に埋もれないだけの十分なダイナミックレンジ（ ~ 1000 以上）が必要となる。一方で、CNDの視直径（ θ ）は、

$$\left(\frac{\theta}{[100 \text{ mas}]}\right) \sim 2 \times \left(\frac{R}{[10 \text{ pc}]}\right) \left(\frac{D}{[10 \text{ Mpc}]}\right)^{-1}$$

で与えられる。ここで、 R は CND の半径、 D は天体までの距離である。多くの既存の VLBI で、距離 100 Mpc 程度の天体の CND を解像することは容易であるものの、 100 mas 程度に広がった放射をイメージングするために、過分解に気を付けなければいけない。NGC 1275 を例にとると、CND の半径は 100 pc 程度であり、仮に $D=10 \text{ Mpc}$ の天体で同様の CND サイズだとすると、1 秒角もの広がりを持つことになる。 300 km 基線長を最短基線に持つ東アジア VLBI (EAVN) の場合、これだけの広がりを持つ天体を過分解せずにイメージングするためには、 1 GHz 付近 (L-band, S-band) もしくはそれ以下の周波数での観測が好ましい。

以上をまとめると、既存の EAVN を想定した場合、観測周波数 1 GHz 付近で、ダイナミックレンジ 1000 以上が必要な性能となる。KaVA による実験で、ダイナミックレンジ 1000 を達成できることが明らかになっていることから (Niinuma et al. 2014)、この目的達成のためには KaVA 相当以上のアンテナ台数、uv カバレッジ、較正精度が求められる。

4. 推進計画

短期・中期（2021 年～） 東アジアでは 1 GHz 帯を観測可能な局が限定されているため、他サイエンスとのバランスを見ながら、VERA・大学望遠鏡の S/L-band 化の検討を行う。ASKAP、FAST との連携も探る。

長期（2030 年） SKA や ngVLA を使った研究の発展が見込まれる。

超広帯域VLBI偏波観測で明らかにする 高質量降着率SMBHの周辺構造

秦 和弘 (水沢VLBI観測所)

1. 研究の意義・背景

活動銀河核 (AGN) の多様な活動性と進化を支配する最重要パラメータの1つが巨大ブラックホール (SMBH) への質量降着率である。特に近年、エディントン限界を超える高質量降着率のAGN/SMBH (以下 high- \dot{M} SMBH) が天文学の多方面で大きな注目を集めている。例えば近年の高赤方偏移クエーサー観測の進展により、太陽質量の10億倍を超えるSMBHが $z > 6-7$ (すなわち宇宙誕生後10億年以内) において次々と見つかっており (e. g., Wu et al. 2015)、これはSMBH形成初期において、エディントン限界を大きく上回る質量降着率でBHが成長している可能性を示唆している。また、輻射磁気流体 (RMHD) シミュレーションの発展により、超臨界 (超エディントン) 降着流は強烈な輻射圧により大量のアウトフロー/ウィンドを放出することが示され (eg., Ohsuga & Mineshige 2011; Kobayashi et al. 2018; 図1左)、このようなSMBHは母銀河へのフィードバックにも多大な影響を与えうる。しかしながら、クエーサーや低光度AGNなど低～中質量降着率の種族に比べ、high- \dot{M} AGNの観測的性質は未だ謎が多く、SMBH基本パラメータスペースにおける最も重要な未開拓領域と言える。それゆえVLBIを用いてhigh- \dot{M} AGNの中心核構造をダイレクトに明らかにすることができれば、BH質量降着理論からSMBH・銀河進化に至る多岐の分野に大きなインパクトを与えうる。

本研究を推進するにあたり、狭輝線1型セイファート銀河 (NLSy1) に着目する。NLSy1はその特異な可視輝線プロファイルと大きな軟X線光度超過から、BH質量が比較的小さく ($M_{\text{BH}} \sim 10^6 M_{\text{sun}}$)、かつエディントン限界を超える質量降着率で急成長中のSMBHと考えられている。特に近年、電波で明るいNLSy1や、ガンマ線 (すなわち相対論的ジェット of 証拠) を伴うNLSy1が多く見つかってきており (Abdo et al. 2009)、これらは電波/VLBIの格好のターゲットとなる。

観測戦略として、中心核の高解像度イメージングに加え、特に両偏波観測によるファラデー回転量度 (Rotation Measure; RM) の測定に着目する。RMは視線方向に存在する電離ガスや磁場の視線積分量に比例する量であり、AGN放射を背景光としてSMBHの周辺環境をトレースするのに有力なプローブである (図1右)。本研究では、VERAやEAVNが世界的にも独創性を発揮する「超広帯域な両偏波VLBI観測」を最大限活かすことで、未だ謎多きhigh- \dot{M} SMBHの周辺構造 (pc～subpcスケール) を明らかにする。

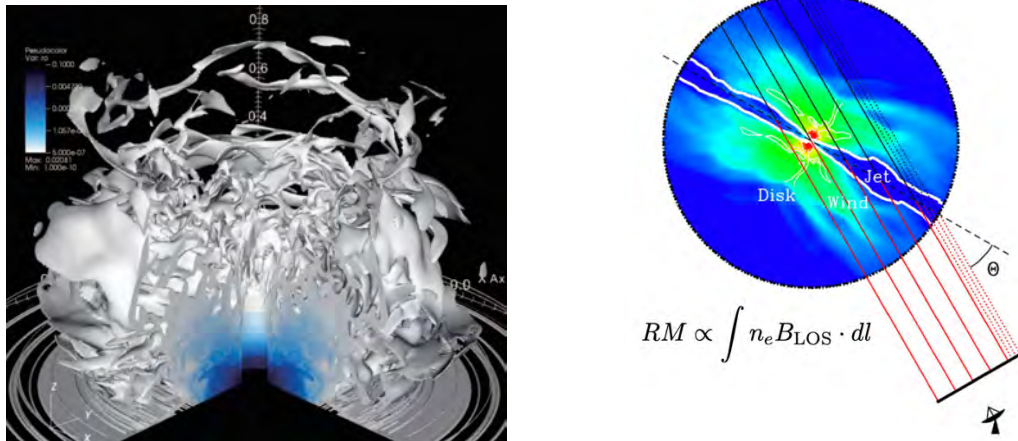


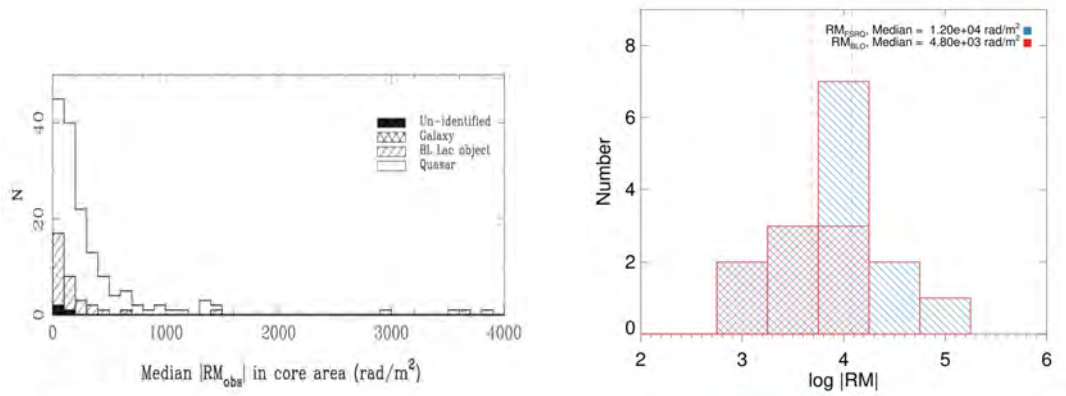
図1：(左図)超臨界降着流の3次元輻射磁気流体シミュレーション (Kobayashi et al. 2018)。(右図)RMを用いたSMBH周辺構造探査概念図 (Broderick & McKinney 2010)。

2. 何をどこまで明らかにするか

本研究では、high-M AGN/SMBH (主にNLSy1) をターゲットに、VERA/EAVNによる超広帯域・両偏波VLBI観測を行い、中心核のRMの系統的探査を行う。これまでの関連先行研究では、VLBA等によってBLLac (低質量降着率) およびクエーサー (中質量降着率) に対する系統的なRM測定が行われており、BLLacよりクエーサーのほうが系統的に大きなRMを示すことが示されている (Hovatta et al. 2012; Park et al. 2018)。解釈は論争中ではあるが (クエーサーのほうがガスリッチな環境にあるという解釈以外にも、ジェットの磁場構造がクエーサーとBLLacで異なるという説もある)、もしもRM変化がSMBH周辺環境の違いに起因する場合、NLSy1種族では更に大きなRMを示す可能性がある。本研究では電波で観測可能なNLSy1を10~100天体規模で大規模サーベイし、RMの分布を明らかにし、BLLacやクエーサーの分布と比較することで、RMの種族依存性を調査し、high-M SMBHのpc-subpcスケールの構造 (降着流やアウトフロー、ガス密度や磁場構造) を明らかにする。

大きなRMを見つけ出すためには、周波数方向に急速に回転する偏波角を $n\pi$ 不定性なしに測定できる必要があり、これは従来のバンド間RM測定方法では不可能であり、1つのバンドで帯域を大きく広げ「インバンド」でRMを測定できるようにする必要がある。これはVERAやEAVNが世界的にもユニークな力を発揮する。

図3に本研究に向けたプレスタディとして、最近傍のradio-loud NLSy1である1H0323+342について、VLBA 15GHzアーカイブデータを用いてinband RMサーチをした結果である (東大 高村美恵子氏の修士論文)。使用データは256MHz帯域と狭く、不定性もまだ大きいものの、実際に $|RM| \sim 10^5$ rad/m²という非常に大きなRMのヒントが見え始めている。



	BLLac	QSO	NLSy1
RM センチ波	~80-400	~150-2000	?
RM ミリ波	~10 ³⁻⁴	~10 ⁴⁻⁵	?

図2：(左図)VLBA/MOJAVE センチ波(8/12/15GHz)による様々なAGNコアのRM探索結果 (Hovatta et al. 2012)。 (右図)KVN ミリ波 (22/43/86GHz)によるBLLacおよびクエーサーコアのRM測定結果(Park et al. 2018)。 (下図)センチ波、ミリ波いずれでもBLLacに比べクエーサーのRMが系統的に大きく、SMBH周辺環境の違いを示唆している。

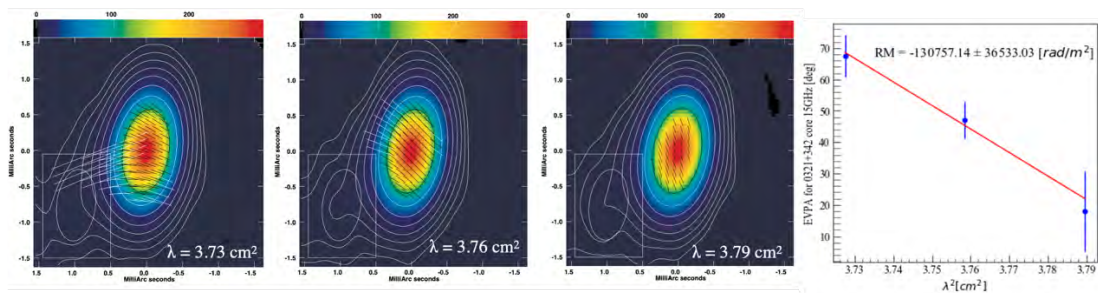


図3：VLBA 15GHzによる1H0323+342のinband RMプレスタディー結果 (東大 高村美恵子氏 修士論文より抜粋)。

3. 期待される学術的インパクト

高質量降着率のSMBH周辺構造が明らかになることで、BH降着円盤理論のやAGN統一モデル構築を促す。更にSMBH形成やAGNのフィードバックなど、銀河やSMBHの宇宙論的進化の理解も促す。

4. 新規性・独創性・他コミュニティとの連携

● 新規性・独創性

- ✓ High-Mという未だ謎多きパラメータスペースのSMBHを、超広帯域inband RMという新たな測定スペースで開拓する点は新しく、独創的である。
- ✓ 従来の方法では測定が難しかった、大きなRMを正確に測定
 - 16Gbps記録 => 2GHzバンド幅, 32Gbps記録 => 4Gbpsバンド幅
 - 観測中にL0を振れば、更に広帯域化
 - EVPAのnπ不定性がない
 - 効率的 (受信機をいちいち変える必要ない)
 - Inbandなので周波数方向に完全同時観測

- ✓ VLBIなので偏波成分をきちんと空間分解できる
 - ALMAやSMAでも(ミリ波で)インバンド広帯域でRM測定できるが、空間分解能が悪く複数の成分がどうしても混合してしまい、観測結果の解釈に大きな不定性が出てしまう
- ✓ 今のところ、超広帯域(>16Gbps)かつ両偏波で定常運用はVERAでしか実現できていない
- 他コミュニティとの連携
 - ✓ NLSy1をはじめとするhigh-M SMBHは可視光やX線観測においても主要ターゲットであり、今後XRISMやTMT等との多波長連携が期待できる。また、超臨界降着流のRMHDシミュレーションは筑波大などが世界をリードしており、国内の理論グループとも強力な連携が期待できる。

5. 必要な装置性能

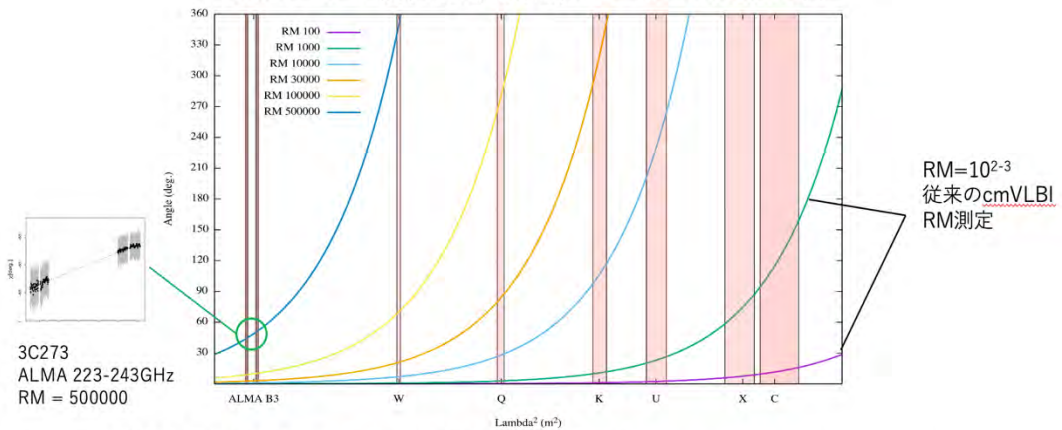
本研究はVERAやEAVNをアップグレードすることで実現可能である。最も重要な性能は、VERA/EAVNを22または43GHz帯で両偏波かつ超広帯域(最大32-64Gbps)で観測できるシステムにすることである。これにより、各バンドにおいて最大4-8GHzの帯域が得られ、偏波角が急速に回転する 10^6rad/m^2 を超えるようなRMに対しても高精度で測定が可能になる。空間分解能は近傍ターゲットにおいて中心核パーセクスケールが空間分解できる1-0.1mas程度が望ましい。感度はどこまで暗い天体まで狙うか次第だが、まずは数100uJy程度のイメージ感度があれば、近傍の明るいNLSy1 10天体程度が調査可能である。100天体規模のサーベイを行うには、更に1桁程度の感度向上が望ましい。

6. 推進計画

- 短期(2021年度): VERA 22/43GHz 16Gbps(2GHz帯域)による22, 43GHz帯広帯域両偏波観測を実施し、近傍の最も明るいNLSy1 約10天体を対象に、inband RMの系統調査を開始する。並行して、VERA OCTAD+OCTADISK2による32Gbps両偏波観測試験を開始する。
- 中期(～2027年度): VERA 16/32Gbpsを用いたinband RMの大規模サーベイを実施する(～100天体規模)。並行して、東アジアと連携してEAVNによる16/32Gbps両偏波観測試験や64Gbps試験、さらに22/43GHz帯同時の広帯域両偏波観測も推進し、超高精度RM測定手法を確立する。また2022年度打ち上げ予定のXRISMなど多波長望遠鏡や理論との共同研究を推進する。中期後半には感度や解像度を高めたサーベイを展開し、より電波で暗い天体や高赤方偏移の天体までサンプルを拡張する。
- 長期(2028年度以降): VERA/EAVNによる独自の観測を継続するとともに、SKAやngVLAを用いた更に詳細な観測研究へ発展させる。

7. 補足資料

2GHzバンド幅(16Gbps記録)といろいろなRMの例



- $RM < 10^3$: 従来のマルチバンド測定法が有利
- $RM > 10^5$: ミリ波が有利(比帯域小さくなるのでミリ波内多バンド必要)
- $RM \sim 10^4 \sim 10^6$: 22/43G帯でinband測定がsweet spot

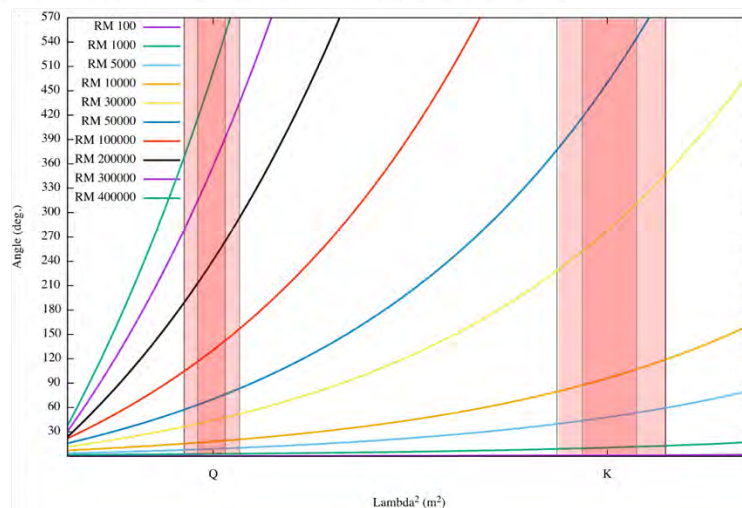


図3 : 22GHz (K), 43GHz (Q) 帯における、様々なRM値における偏波角の回転と観測バンド幅の関係。濃い赤が2GHz幅(16Gbps記録), 薄い赤が4GHz幅(32Gbps記録)を示す。22/43GHz帯では、 $RM = 10^4 \sim 10^6$ rad/m²がバンド内で有意に偏波角が回転し、ただn π 不定性が生じないちょうどいいレンジであることがわかる。

参考文献

1. Wu et al. 2015, Nature, 518, 512
3. Ohsuga & Mineshige 2011, ApJ, 736, 2
4. Kobayashi et al. 2018, PASJ, 70, 561
5. Broderick & McKinney 2010, ApJ, 725, 750
6. Hovatta et al. 2012, AJ, 144, 105
7. Park et al. 2018, ApJ, 860, 112
8. 高村美恵子 2021, 東京大学 修士論文