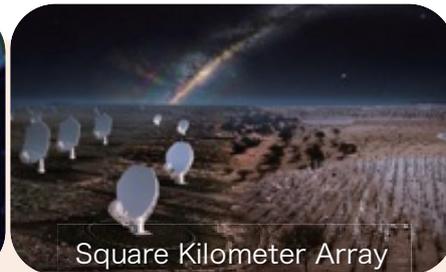


VLBI将来計画WG 検討報告書

2021年6月 第4版

VLBI 将来計画ワーキンググループ



概要

【背景】 VLBIはその圧倒的な角度分解能によって測地地球物理や天文学といった観測的研究において今なお独自性を発揮し続けている。また目的を共有した国際協力を生み出しやすいという側面も併せ持つとともに、科学的研究と技術開発研究との間でも大きなシナジーを生み出し続けている。この国際協力の経験をもとに、1990年代からは国内でもスペースVLBIプロジェクト（VSOP）やVERAプロジェクト、大学VLBI連携（JVN）など日本独自のVLBIプロジェクトやVLBIアレイが立ち上がるとともに、定常的なアレイの維持・運用といった実務上の経験も獲得することができた。こうした経験が、東アジアVLBI観測網（EAVN）の立ち上げ、EAVNによる研究を通じた若い研究者の育成、および東アジアにおけるVLBIコミュニティの拡大へとつながってきている。一方で、およそ20年にわたり日本のVLBIの中核を担ってきたVERAプロジェクトが第3期中期計画の終了とともにプロジェクト終了を見据え成果を取りまとめる時期に入るなど、日本のVLBIコミュニティにとっては、いま大きな節目の時期を迎えている。

【ワーキンググループの設立と獲得目標】 第4期中期計画および長期的に、日本のVLBIコミュニティが目指すべき方向性を、科学的観点に基づいた将来計画として提案する必要がある。そのため、VLBIコミュニティの将来計画を集中的に検討・提案するVLBI将来計画ワーキンググループ（将来計画WG）がVLBI懇談会の中に設立された。将来計画WGの獲得目標は「学問分野におけるVLBIの独自性や優位性および世界の潮流を踏まえ、今後注力すべき研究課題は何か、国立天文台水沢VLBI観測所と大学などのユーザーがどのように協力し研究を進展させていくべきか、の2点をコミュニティ全体で共有することである。宇宙における階層構造を意識した5つの科学検討班（SWG）をWGの中に設置し、構成メンバーは最終的に25名となった。WGのメンバーの過半数は大学に所属する研究者となったが、国立天文台のVLBI関連研究者も全体の4割程度を占め、国内のVLBIコミュニティにおける将来計画を検討するにあたりバランスの取れたメンバー構成となった（国外研究機関所属の研究者および学生も参加）。

【検討方針と活動内容】 2020年3月末にWGを立ち上げて以降、サイエンスの検討のみならず、システムや装置など開発の観点を踏まえた計画の実現性、さらには将来の大型装置計画のタイムラインも見据えながら議論を重ねた。SWGにおける議論とSWGのPIおよびVLBI科学諮問委員会の委員長で構成されるWG全体のミーティングは独立に行うこととしたが、SWGで検討を進めるにあたり、本WGの設立目的である「科学的見地から将来進めるべき研究計画を検討する」という点を共有した。

全体ミーティングではSWGでの検討状況やVLBIコミュニティに関係する周辺状況の変化などの情報を共有し、その後の検討方針についての議論を行なった。また、コミュニティとも検討状況を共有するため、様々な研究において報告・議論を行なった。本WGが提案する研究をどう実現していくかにあたっては、国内VLBI研究推進母体の中心となっている国立天文台水沢VLBI観測所、水沢と連携してVLBI研究を進めている大学VLBI連携、および、水沢VLBI観測所の下でSKA1プロジェクトへの参加計画を検討しているSKA1検討グループなどの各プロジェクトにおいて調整をしながら実現性を考慮した計画として取り込まれることが期待される。

【検討結果】 各SWGの検討した将来計画に通底する**星の誕生と終焉およびコンパクト星の起源と進化の解明、および銀河と超巨大ブラックホールの形成と進化の解明**の2つを国内VLBIコミュニティの将来計画の柱として提案する。

他の観測装置を圧倒する空間分解能・位置決定精度は、VLBIにおける非常に強い独自性であるとともに、他の研究手法とも相補的かつ強いシナジーを期待できる特色である。上記の柱を実現するために、

1. センチ波帯を網羅した観測システムの開発およびアレイの拡張により、高空間分解能観測によるコンパクト天体の研究分野の開拓と大学を中心に実績を積み重ねているメタノールレーザーモニターを基軸とした大質量星形成過程の観測的研究を発展させる
2. 従来のミリ波帯を中心とした老齢星における質量放出過程の観測的研究、天の川銀河中心領域の位置天文観測、超巨大ブラックホールおよび活動銀河核ジェットの研究の継続および、86GHzなど、より高い周波数のアレイへ拡張し研究を発展させる
3. アレイの超広帯域化による地球内部の流体核自由章動/内核自由章動の高精度計測により、内部組成・構造・運動の理解を目指す

ことが重要になる。3については、将来的にはさらに惑星内部構造への応用から銀河系内における太陽系運動の再定義といった非常に幅広い学問分野への波及効果も期待できる。いずれもVLBIだからこそ実現可能なアプローチであり、東アジアとの連携が非常に重要となる。そのためには継続的な開発の努力が必要になるものの、科学的な重要度は高く、国際的に非常に競争力のある研究を展開できると期待される。

目次

1	ワーキンググループ設立趣旨	5
1.1	背景	5
1.2	サブワーキンググループ	5
1.3	獲得目標	6
2	活動内容	6
3	議論の方針	7
3.1	タイムラインについて	9
4	検討結果	9
4.1	目指すサイエンス	9
4.2	計画の実現に向けた整備・開発	12
	執筆者リスト	14
S1	計画概要：極限天体 WG	16
S2	計画概要：地球・測地 WG	21
S3	計画概要：星 WG	26
S4	計画概要：銀河 WG	35

1 ワーキンググループ設立趣旨

1.1 背景

VLBIはその圧倒的な角度分解能によって測地地球物理や天文学といった観測的研究において今なお独自性を発揮し続けている。また目的を共有した国際協力を生み出しやすいという側面も併せ持つとともに、科学的研究と技術開発研究との間でも大きなシナジーを生み出し続けている。日本の電波観測グループも国内電波望遠鏡の国際VLBIネットワークへの参加による測地観測、天文観測を通じて多くの国際共同研究の経験を培ってきた。

この国際共同研究の経験をもとに、1990年代からは国内でもスペースVLBIプロジェクト（VSOP）やVERAプロジェクト、大学VLBI連携（JVN）など日本独自のVLBIプロジェクトやVLBIアレイが立ち上がるとともに、定常的なアレイの維持や運用といった実務上の経験も蓄積されたことで、日本人研究者主導のVLBIを用いた科学成果も多く生み出されるようになってきた。また、「日本のVLBIアレイ」と日韓の協力に基づくVLBIアレイ（KaVA）が立ち上がり、さらにはJVNやKaVAを土台として東アジアVLBI観測網（EAVN）が立ち上がってきた。このように自分たちの地域における強力な「マイテレスコープ」が立ち上がったことで、若い研究者の人的交流も活発になり東アジアにおけるVLBIコミュニティは拡大し続けている。さらに東南アジアの国々も東アジア地域のVLBI観測網への参加を目指し電波望遠鏡を立ち上げつつあるなど、今後もアジア地域のVLBI観測網は発展が期待できる。

このように日本のVLBI研究の経験は、アジアの研究コミュニティの形成に非常に大きな役割を担ってきた一方で、およそ20年にわたり日本のVLBIの中核を担ってきたVERAプロジェクトが第3期中期計画の終了とともにプロジェクトの終了を見据え成果を取りまとめる時期に入るなど、日本のVLBIコミュニティにとっては、いま大きな節目の時期を迎えている。

このような背景の中、第4期中期計画（2022年度–2027年度）およびそれ以降、日本のVLBIコミュニティは何を目指すのか？について、将来計画を検討しコミュニティで共有していく必要がある。2019年度のVLBI懇談会シンポジウム（2019年11月に開催）において、将来計画を集中的に検討するための「VLBI将来計画ワーキンググループ（WG）」をVLBI懇談会の中に立ち上げ検討を進めてきた。WGが目標とするのは、**科学的観点から今後VLBIによって進めるべき将来計画を検討・提案すること**である。国内VLBIの将来計画の柱となりうるサイエンスを検討するとともに、各種リソースへの要求、計画としての実現性についても検討を進める。検討過程においては時間領域、多波長、マルチメッセンジャー、超広帯域2013遅延決定精度向上など、様々な分野においても重要と思われるパラメータにVLBIの新しいディスカバリースペースを見いだせるか？という観点も意識し検討を行う。

1.2 サブワーキンググループ

宇宙における階層構造も意識し、極限天体WG、地球物理・測地WG、星WG、銀河WG、開発WGの5つの科学検討班（SWG）を設置し、各班のPIはVLBI懇談会会員の推薦を参考に決定した。SWGのメンバーについては、各PIによる選定に加え、VLBIコミュニティからも参加希望者を広く募った。また、VLBIコミュニティ以外のメンバーの参加については各PIの裁量に委ねることとした（ただし、コアメンバーはVLBIを用いた研究経験を持つ人間とする）。このような経緯を経て、2020年3月にVLBI将来計画WGとしての活動を

開始した。WGは全部で25名（うち学生1名）で構成されている。WGメンバーの所属および世代の内訳を図1、2に示している。

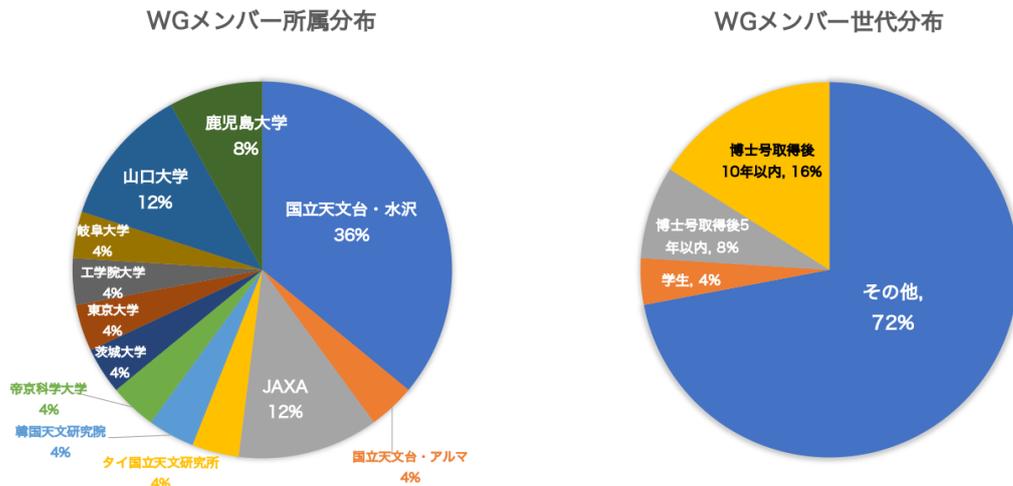


図1: 国立天文台、国立天文台以外の研究所、大学に所属する研究者がおおよそ同じ割合となっている。図2: 学生および博士号取得後10年以内の研究者がおおよそ1/4を占めている。

図1から分かるように、全体の5分の2を国立天文台においてVLBI研究に関わる研究者が占めており、コミュニティと国立天文台水沢VLBI観測所が一丸となって議論を交わしながらVLBIの将来計画に関する検討を進めてきた。

1.3 獲得目標

学問分野におけるVLBIの独自性や優位性および世界の潮流を踏まえ、次期中期計画および10年から20年先を見据えた長期的視点の両方の視点で、コミュニティが今後注力すべき研究課題とその課題にVLBIがどう貢献しうるのか、さらには大学共同利用機関である国立天文台水沢VLBI観測所と大学などのユーザーがどのように協力し研究を発展させていくべきかをコミュニティ全体で共有する。

2 活動内容

2020年3月末に5つのワーキンググループを立ち上げて以降、およそ1年の間にSWG毎のミーティングを多いところで20回近く開催し、10年以上先を見越して取り組むべきサイエンスについて集中的な議論を行ってきた。SWGにおける個別のサイエンス検討に加えて、装置開発検討班も将来計画WGの中で立ち上げたことによって、サイエンストピックの検討のみならず、計画を実現するため必要なシステムや装置、装置開発の観点での実現性も含めて議論することを目指した。さらには将来の大型装置の立ち上げタイムラインも見据えながら議論を重ねた。

SWG毎の検討内容および会合の開催頻度についてはSWGのPIおよびメンバーに一任し、将来計画WG全体として有機的に議論を進めるため、各WGのPIおよびVLBI科学諮問委員会の委員長を交えた全体ミーティングをおおよそ3週間に1度の頻度で計17回開催してきた。全体ミーティングでは各WGの議論の状況や検討方針に関する問題点、VLBIコ

コミュニティに関係する周辺状況の変化などを全体として共有し、SWGへフィードバックすることを意識してきた。また、検討内容をコミュニティとも共有するため、夏から秋にかけて途中経過報告のための研究会（中間まとめ報告会¹、水沢 VLBI 観測所ユーザーズミーティング²）における状況報告、および 2020 年度 VLBI 懇談会シンポジウム³での検討結果の報告、2020 年末までに計画の概要書（各 WG 数ページで検討内容の概要を作成）の作成を目標に議論を進めてきた。表 1には WG としての活動履歴をまとめている。

3 議論の方針

各サブ WG において議論を進めるにあたっては、本 WG の設立目的である「科学的見地から将来進めるべき研究計画を検討する」という点を念頭に、

1. 宇宙物理学・天文学における重要課題は何か？課題を解決するために VLBI はどう貢献しうるか？について、リソースの境界条件に縛られずに検討を行う
2. 従来取り組んできたサイエンスを発展させることで課題を解決することができるのか、あるいは培ってきた科学的手法・技術を活用し新たなサイエンスを開拓する必要があるのか、検討を行う

という 2 つの方針を共有した。そのうえで、第 4 期中期計画の 6 ヶ年、さらに 10–20 年先までを見据えた短期的・長期的な両方の視点で計画を検討する。さらに研究計画を検討するにあたり、大学望遠鏡（単一鏡・干渉計・VLBI）や VERA/JVN/KaVA/EAVN や ALMA といった既存の共同利用装置を用いてどこまで計画を進めることができるのか、Global VLBI Alliance、SKA1、SKA2、ngVLA、ngEHT、space-VLBI といった将来の大型計画で最終的な目標が達成可能であるか、あるいは全く新しい装置が必要になるのか、ということ自分たちの観測装置と他のアレイとの協調のみならず、運用や保守といった観点も含めて検討する必要がある。また、国立天文台水沢観測所 SKA 科学検討 WG/大学 VLBI 連携研究計画（国立天文台・A プロジェクト）といった国内の VLBI コミュニティの中でこれまでに検討された研究計画との関係性についても整理し、水沢 VLBI 観測所とユーザーコミュニティがどのように協調していくべきかについても議論を進め、国内 VLBI コミュニティ全体で共有する。最終的に示される科学目標および研究計画はあくまで国内 VLBI コミュニティで共有する「研究の柱」という位置付けであり、関連研究や研究の芽を見出すような萌芽的な研究に取り組む姿勢は常に必要である。

本 WG で議論を進めた研究計画は、VLBI で行うべき研究について科学的観点から検討を行った結果である。提案された研究をどう実現していくかにあたっては、現在の国内 VLBI 研究推進母体の中心となっている国立天文台水沢 VLBI 観測所、水沢と連携して VLBI 研究を進めている大学 VLBI 連携、および、水沢 VLBI 観測所の下で SKA1 プロジェクトへの参加計画を検討している SKA1 検討グループなどの各プロジェクトにおいて、第 4 期中期計画へのそれぞれの新規プロジェクト提案内で調整しつつ、実現性を考慮した計画として取り込まれることが期待される。

¹<https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/vcon/index.html>

²<https://www.miz.nao.ac.jp/veraserver/restricted/UM2020/index.html>, 広範なコミュニティに向けて報告

³<https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/vcon/symposium2020/index.html>

3 議論の方針

表 1: VLBI 将来計画 WG の活動履歴。全 17 回の全体ミーティングを開催するとともに、様々な機会においてコミュニティへの検討状況・検討結果の報告を行なった。

将来計画 WG 活動履歴	内容	実施日
2020 年		
第 1 回全体ミーティング	WG 立ち上げ方針検討	3 月 4 日
第 2 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	4 月 16 日
第 3 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	5 月 14 日
第 4 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	6 月 4 日
第 5 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	6 月 25 日
第 6 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	7 月 16 日
第 7 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	8 月 6 日
第 8 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	8 月 27 日
第 9 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	9 月 17 日
中間まとめ報告会開催	検討状況について WG 全メンバーと情報共有 および VLBI 懇談会会員への報告と意見の確認	9 月 23 日
2020 年度水沢 VLBI 観測所ユーザーズ ミーティングにおける報告・議論	将来計画 WG の計画検討状況について報告 およびコミュニティからの意見確認	9 月 24-25 日
第 10 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	10 月 9 日
第 11 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	10 月 26 日
第 12 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	11 月 4 日
第 13 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	11 月 11 日
2020 年度 VLBI 懇談会シンポジウム における報告・議論	コミュニティへの検討結果報告および報告に 基づく議論	11 月 16-17 日
第 14 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	12/11
2020 年度宇宙電波懇談会シンポジウム における報告・議論	電波天文コミュニティへ対する VLBI 将来 計画についての報告	12 月 21-23 日
第 15 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	12/25 日
2021 年		
第 16 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	2 月 4 日
第 17 回全体ミーティング	情報共有/SWG 活動報告/今後の方針議論	3 月 1 日
2021 年日本天文学会春季年会 における報告・議論	天文コミュニティへ VLBI の将来計画 について報告	3 月 16-19 日

3.1 タイムラインについて

短期的視点では2021年度を研究（計画）の移行期間と位置付け、第4期中期計画（2022年度–2027年度）における計画の準備研究を開始する。長期的視点での検討においては、各WGともに次世代の国際大型観測装置となりうるSKA1/SKA2, ngVLA, e-ALMA, ngEHT等の大型電波観測装置および他の波長の将来計画も意識する。一方で、10年以上先を見据えた際、必ずしも計画されている将来の大型装置のみで十分というわけではなく、国内望遠鏡の強化およびスペースへの展開などによって初めて実現可能な研究についても検討する必要がある。新たな開発を要求するであろうこれらの計画は、最終的にはアジアにおけるVLBIの機能を強化するだけでなく、グローバルアレイという枠組みにおいても日本の独自性を発揮することのできる将来計画となることが期待できる。

4 検討結果

各ワーキンググループにおける検討結果についてはサマリーレポートとしてまとめ、S1章からS4章として本報告書に添付している。各レポートは「VLBIで紐解くコンパクト星の誕生と進化（S1章）」、「広帯域VLBIを用いたマイクロ秒角精度の章動計測：地球のコアの運動を探る（S2章）」、「VLBIで解明する星の誕生と終焉の様子（S3章）」、「VLBIで解明する銀河と超巨大ブラックホールの形成と進化（S4章）」というテーマを掲げており、宇宙の階層構造においてどのような学術的な課題があるのか、その課題を解決するためにはどのような研究をどのような計画で行う必要があるのか、そして課題解決のための手段としてVLBIもしくは高空間分解能観測の独自性・重要性は何か、についてまとめている。また、各課題および解決のための手段と必要なリソース、そして実行計画の関係を可視化するため、サイエンストレイサビリティマトリックス、システム要求、研究計画の一覧表を作成している（各WGサマリーレポート補足資料とともに本文書に添付）。

ここでは将来計画WGでまとめた検討結果の概要を述べるに留めるため、各研究計画の詳細および定量的な議論についてはサマリー文書および上記一覧表等をご参照いただきたい。

4.1 目指すサイエンス

「宇宙・天体の誕生と進化」および「生命・物質の起源」はあらゆる科学的課題の中で人類にとって根源的な問いであり、地球・惑星物理学・天文学・宇宙物理学にとって最も重要な学術的課題である。この課題を解決する上で、非常にコンパクトな空間スケールの天体現象や非常に遠方の天体現象などは極めて重要な観測対象である。VLBIは、電磁波帯を横断するあらゆる観測装置の中において他を圧倒する空間分解能と長年積み重ねられた測位技術に基づく高い位置決定精度によって、これらの天体現象のわずかな位置・構造の変化の「瞬間」を捉えることができるとともに、宇宙論的な距離の天体現象であっても、系外銀河内の「どこ」で発生した現象であるかを特定できる唯一の装置である。さらには、その極めて高い空間分解能により極限的な高エネルギー物理現象を反映する非熱的放射を選択的に捉えることも可能である。宇宙の階層構造におけるダイナミックな現象の観測的研究に強い独自性を有するとともに、他の観測的手法とも相補的かつ非常に強いシナジーを生み出すことのできる装置である。

本WGでは、10年先、20年先という長期的に取り組むべき科学的な重要課題は何か？そして、VLBIはそれらの重要課題に対して何を明らかにできるのか？に焦点を絞って検討を重

宇宙の階層構造における起源と進化 VLBIが捉える星と極限天体の変化の瞬間

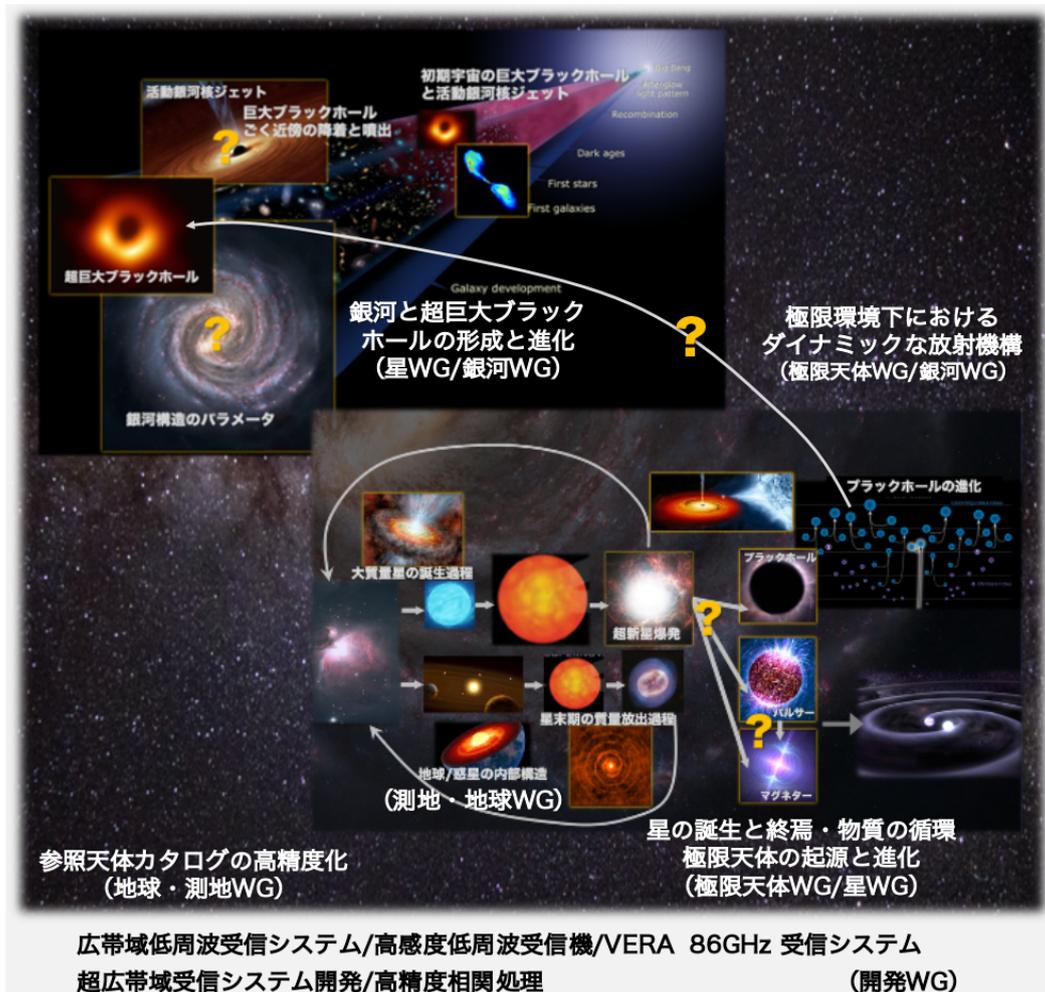


図 3: 将来計画の柱と SWG が提案するサイエンスの関係。

ねてきた。およそ1年にわたる検討の結果、それぞれのSWGから提案されたサイエンスに通底する

- 星の誕生と終焉およびコンパクト星の起源と進化の解明
- 銀河と超巨大ブラックホールの形成と進化の解明

の2つを国内のVLBIコミュニティの将来計画の柱として提案するに至った。図3は提案する将来計画におけるSWGの掲げるサイエンスの横断的な関係のイメージ図である。これらを達成するため、以下の3つの観点で観測的研究を進めていく。

1つ目はミリ波帯からセンチ波帯への延伸および高感度化によって、コンパクト天体の起源・進化に関する観測的研究およびメタノールレーザーをプローブとした大質量星形成領域の質量降着機構の観測的研究を展開していく(S1章およびS3章)。

中性子星や星質量ブラックホールは超新星爆発でのみ誕生することが知られているため、これらの起源・進化を明らかにすることは宇宙における物質循環の理解が大きく進む。さら

には進化の過程を観測的に明らかにすることができれば、例えばコンパクト星同士の連星系がどのように形成され、その後合体によって質量の大きなブラックホールが誕生する、という重力波観測によって明らかになったシナリオとも直接的に繋がり、ブラックホールの成長過程の理解に大きなブレークスルーをもたらす可能性があるため、特に系内にあるこれら天体は極めて重要な研究対象である。従来、コンパクト天体については、日本の可視・赤外や高エネルギーのコミュニティが観測的研究で世界をリードする成果を挙げてきた。しかしながら、高分解能・高精度位置天文観測が可能な VLBI による高時間分解能観測を実現することで、独自の立場でコンパクト天体に関する新しい知見を生み出すことができ、強いシナジーを期待できる。

大質量星の形成過程に関する研究については、メタノールレーザーフレア時の ToO 観測を中心として、VLBI を用いた質量降着機構に関する観測的研究を行う。さらには VLBI に限らず、大学望遠鏡を中心として実施しているメタノールレーザーの定常モニター観測による大質量星の質量降着機構の研究や大質量星形成最初期および末期の段階にある天体の探査、などを継続していくことで、大質量星形成過程に関する多角的なアプローチによる研究が可能となる。また、大質量星は星団内で連星系として形成されることが多く、連星形成機構やその性質を明らかにすることは、恒星進化末期におけるコンパクト天体の連星系や恒星質量ブラックホールにおける質量降着機構や合体の初期状態の解明にも直結する。また、(大) 質量星形成における円盤降着や円盤風・アウトフロー駆動機構は、コンパクト星周辺の降着円盤やジェットとの類似性もあり、これら物理現象の解明において理論研究を通じたシナジーも期待される。

2つ目はコミュニティがこれまで VERA や EAVN を中心としミリ波帯で推進してきた、天の川銀河中心領域の位置天文観測および老齢星の質量放過程の観測的研究、そして活動銀河核ジェットの生成/放射機構の解明、そして究極的には巨大ブラックホールと降着円盤そして活動銀河核ジェットの形成を結びつける機構に関する観測的研究を発展させていく (S3章および S4章)。

従来、22GHz/43GHz 帯での観測を中心にこれらの研究は実施してきたが、VERA の両偏波化完了に伴い同周波数帯における VERA/EAVN の機能が強化されたため今後も研究の進展が見込める。一方、世界的な情勢も踏まえると、東アジアにおける 86GHz 帯の VLBI 観測網を強化することにより、これまでも日本が成果をあげてきたこれらの研究がさらに加速し世界をリードする成果の創出も期待できる。

一方、センチ波帯の高感度観測網を用いることによって従来進めてきたミリ波帯における研究とは異なるアプローチによって、高赤方偏移クエーサーの観測および近傍 AGN との比較による超巨大ブラックホールの形成・進化メカニズムの観測的研究、ジェット微細構造の可視化によるエネルギー変換機構や星間空間との相互作用に関する観測的研究、といった研究も展開する。

3つ目は地球物理・測地学に関する観点である。同分野における将来計画としては流体核自由章動 (FCN) および内核自由章動 (FICN) の精密計測が掲げられている。地球の FCN/FICN の精密計測には、GCRS に準拠していることから VLBI が最も計測に対する stability が高く、最善の手段である。そして、これらの精密検出と予測モデルへのフィードバックによって、地球・惑星コアの形状や回転運動、コアの組成・構造およびマントルへの伝達の詳細理解が可能になると期待されている。FCN/FICN の精密計測のためには、最終的には $< 10\mu\text{as}$ の角度計測精度および遅延計測精度が標準偏差で $< 10\text{ps}$ を達成できるだけの観測性能が必要となる。この性能を達成するためには継続的な広帯域化を含むアレイの強化に加え、相関処理性能の向上、遅延決定精度の向上、基準座標系の向上、等、VLBI 観測に関連する全て

の要素の改善が必要となるため、10年スパンの長期的な観点で徐々に研究を進展させていく必要がある。一方、これらの”インフラ”の精度の向上はVLBIを用いた観測的研究のみならず、科学研究全般が広く恩恵を受けるものであり、宇宙物理学・天文学・地球物理学などの学問分野に対するインパクトは非常に大きいはずである。

4.2 計画の実現に向けた整備・開発

科学目標(4.1章)の達成に向け、東アジアVLBI観測網との連携を見据えた低周波帯への拡張(VERAのアップグレード、国内大型望遠鏡のアップグレード、(最終的には1GHz以下への延伸)、86GHzVLBIアレイの強化(野辺山との連携、VERAのアップグレード検討、東アジアとの連携)、そして広帯域化および受信機の低雑音化によるアレイの高感度化のための開発・整備等を進める必要がある。それぞれの項目に関する検討、期待、展望等については以下にまとめる。なお、ここでの項目の並びは、優先順位を表しているわけではないことを注意していただきたい。VERAの運用および東アジアVLBI観測網の日本側拠点である国立天文台水沢VLBI観測所を中心として、コミュニティで実現に向けた具体的な検討を行っていくことを期待する。

また、さらに長期的な視点ではミリ波・サブミリ波帯のスペースVLBIによる研究およびその準備段階の研究の検討も進めていく必要があり、本WGとは独立に予備的な検討活動が進められていることについても述べておく(本WGのメンバーも数名参加)。

4.2.1 東アジアVLBI観測網との連携を見据えた低周波帯への拡張

東アジアにおける大型望遠鏡との連携および将来の大型電波干渉計との接続を見据えた低周波帯への延伸に向けた開発が必要となり、そのためには25GHz以下のGHz帯全てをカバーするような受信システムの開発が必要になる。C/X/K帯を同時に受信可能な給電部については大阪府立大学を中心とし技術的検討が進められている。冷却等による高感度化など電波望遠鏡への実装に向けた開発・試験の検討を早急に進めるとともに、さらなる低周波帯への拡張についても技術検討を並行して行なっていく。一方、バックエンドについては、開発WGにおける検討のもと、複数の周波数帯域に分けて取り扱うことにより、大きな開発を必要とせず実現可能であるという見通しが報告がされており、現時点でも技術的な観点ではフィージビリティは十分にある。

コンパクト星の誕生や進化という点に着目した研究という点では、国際的にもVLBIを用いた観測的研究は実施されているが、感度的な制約から成果は限定的である。したがって、東アジアに多く存在する低周波観測可能な大型望遠鏡との連携も見据えVERAを低周波にも延伸しかつ高感度化した上でプロジェクト的な観測的研究を推進すれば、国内でも波長横断的に有機的な研究が実現しコンパクト天体の研究に大きな進展が期待できる。さらには、このような東アジア地域の大型鏡の連携による低周波帯超高感度観測網の実現は、中性子星をはじめとするコンパクト天体のみならず、非常に暗い宇宙論的距離における巨大ブラックホールジェットの研究に基づく統計的な議論などが可能になる、など非常に国際的に競争力のある装置となることが期待される。

4.2.2 86GHz VLBI アレイの強化

WGではEAVNアレイにおいて重要な空間周波数カバレッジを提供するVERA局の86GHz化に関する検討を行い、観測環境としてのフィージビリティも調査している。また、86GHzでの定常的なVLBI観測を継続しているKVNとの連携を見据え、大学と国立天文台が連携しながら野辺山45m電波望遠鏡に22/43/86GHz同時受信システムおよびVLBI専用バックエンドシステムの導入が進められている。EAVNにおいて86GHz帯観測を定常化する上で、依然ミリ波において世界最高レベルの感度を有する野辺山45mの定常的なVLBI観測への参加は科学的なメリットが非常に大きい。

4.2.3 広帯域化および受信システムの低雑音化によるアレイの高感度化

広帯域化および受信システムの低雑音化は4.1章における観点1から3のサイエンス計画の全てにおいて検討すべき重要項目である。また、天文観測における高感度化という側面のみならず、測地観測における遅延決定精度の向上という観点からも受信機の低雑音化だけでなく非常に広い帯域を用いた観測は必須となる。一方、観測帯域の拡張を目指すあたり、受信システムだけでなく、相関器の開発もしくは改修およびポストプロセスにおけるデータ較正手法に関する検討も合わせて行う必要がある。

4.2.4 スペース VLBI

さらに長期的な視点ではミリ波・サブミリ波帯のスペース VLBI による研究およびその準備段階の研究の検討も進めていく必要がある。スペース VLBI について、ngEHT にスペース局を加える国際検討が Keck Institute の検討プログラムにて実施されており、日本からも検討に参加している。また、国内にも別途 WG (“スペース VLBI 技術調査会”; 本 WG のメンバーも数名参加) が組織され、国産のスペース VLBI を実現する場合の技術的な制約を識別するケーススタディが行われ、技術成熟度に裏付けられる形での初期科学検討へ進みつつある。科学要求が技術成熟度と整合する見込みがたてば、Research Group または Working Group を組織し、ngEHT 230 GHz 国際地上網への参加を含めた国内および国際的枠組みでのロードマップの策定、科学検討および重要技術の開発をおこなうことになる。

執筆者リスト

(50音順, ◎はワーキンググループPI)

赤堀卓也 国立天文台/SKAO (極限天体 WG)
今井裕 鹿児島大学 (星 WG)
Eie Sujin 東京大学 (極限天体 WG)
小山友明 国立天文台 (開発 WG)
紀基樹 工学院大学 (銀河 WG)
木村公洋 JAXA (開発 WG)
倉山智春 帝京科学大学 (星 WG)
河野裕介 国立天文台 (◎開発 WG)
小林秀行 国立天文台 (開発 WG)
酒井大祐 国立天文台 (銀河 WG)
坂井伸行 韓国天文研究院 (銀河 WG)
寺家孝明 国立天文台 (◎地球 WG)
杉山孝一郎 タイ国立天文研究所 (星 WG)
須藤広志 岐阜大学 (星 WG)
岳藤一宏 JAXA (開発 WG)
土居明広 JAXA (銀河 WG)
中川垂紀治 鹿児島大学 (◎星 WG)
永井洋 国立天文台 (銀河 WG)
永山匠 国立天文台 (◎銀河 WG)
新沼浩太郎 山口大学 (◎極限天体 WG/銀河 WG)
秦和弘 国立天文台 (◎銀河 WG)
廣田朋也 国立天文台 (◎星 WG)
藤澤健太 山口大学 (極限天体 WG)
元木業人 山口大学 (星 WG)
米倉覚則 茨城大学 (星 WG)

S. サブワーキンググループ 検討結果概要

S1 計画概要：極限天体 WG

「VLBIで紐解くコンパクト星の誕生と進化」

VLBI 将来計画 WG：極限天体 WG

研究の意義

従来の研究状況・問題点

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。

何を明らかにするのか？

中性子星はどのように生まれ進化するのか？、若い中性子星はどのような性質を持っているのか？、中性子星はどのように電磁波放射するのか？、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？、ブラックホールのジェットはどのように発生するのか？、を明らかにするため「中性子星の起源と進化および放射機構の解明」および「系内ブラックホールの起源と放射機構の解明」を2つの柱として研究を進めていく（詳細は appendix 参照）。

達成するための手段

1. 中性子星の起源と進化および放射機構の解明

定常パルスの長期モニタリング観測とアウトバーストの追観測を行う。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。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。広帯域放射スペクトルを獲得し、幕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。また、発現後数十年程度の極近傍に存在する系外超新星残骸を撮像観測し、若い中性子星探査に適した環境の天体を絞り込む。100歳未満の中性子星の電波放射について、突発性パルスの有無を含め10年間の上限を与える。

2. 系内ブラックホールの起源と放射機構の解明

ブラックホールが超新星爆発とともに誕生したと考えれば、パルサーと同様大きな特異運動を有するはずである。O/OB 型星と連星系を成しているブラックホールは誕生から間も無いと考えられるため、これらを観測対象として特異運動を $\Delta v = 10 \text{ km s}^{-1}$ の精度で測定することで、“ブラックホールの生まれた場所”を探索する。また、他の電磁波帯とも連携した高頻度電波強度モニター、アウトバースト時における AU スケールの空間構造を短時間撮像モニターし、ジェットの発生機構についても調べる。

期待される学問的インパクト・周辺分野への波及効果

ブラックホール研究では、位置天文観測により世界で初めて起源となる超新星爆発の発見と、星質量ブラックホールの年齢を推定できる可能性がある。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、バイプロダクトとして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。ブラックホールと中性子星の起源となる超新星爆発や親星に関する、直接的な観測的知見を初めて獲得することにより、星の誕生と進化などの研究分野への波及効果が期待できる。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し、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。

なにをどこまでやるのか？

超新星爆発からどのようなコンパクト天体が誕生しどのように進化するのか、という観測的知見を獲得するために、ガンマ線連星を含む 10 個の O/OB 型星とブラックホールの連星、および自転周期変化率が 10^{-13} 以上の若い中性子星 (10 のパルサー、10 の強磁場パルサー、10 のマグネター) について位置、天球面運動速度、距離を推定する。系外の若い超新星残骸についても 5 天体程度を対象に非常に若い中性子星を探索する。以上の位置天文研究に加えて、星とブラックホールの連星については強度・構造の時間領域探索によりジェットの発生機構の理解を目指し、中性子星については長期監視観測の減衰指数推定から中性子星の進化経路の理解を目指す。中性子星ではパルスの両偏波広帯域観測により放射機構の理解を目指し、量子電磁気学・量子色力学的効果の発現を探索する。最終的には年間 2000 時間の観測時間を投入し、10 年のモニター観測を実行することで目的を達成する。

新規性

1. 中性子星の起源と進化および放射機構の解明

パルサーは Parkes にて 2000 個以上観測されてきたが、位置天文の精度はない。VLBA はおよそ 30 天体のパルサーの年周視差計測について、 $50 \mu\text{as}$ の位置精度を達成しているが、マグネターは含まれず、観測周波数帯域も狭い。加えて、自転周期変化率の大きい複数の種族の中性子星に特化したカタログは存在しない。また、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。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索する上で、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と放射機構の解明

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。他の電磁波帯とも連携した高頻度電波強度モニター、アウトバースト時の短時間撮像モニターを実施し、ジェットの発生機構について調べる。特により速い強度変動に注目したモニターを系統的に実施する。

日本の（VLBI 研究の）独自性・優位性/先行研究

我々（VLBI コミュニティ）の経験

10 年間の長期に渡る位置天文計測は、安定した望遠鏡の運用と精度・品質の確保がなければ絶対に成し得ない。このノウハウは一朝一夕では得られず、120 年にわたり測量で世界に貢献してきた水沢 VLBI 観測所と、毎日の根気強い観測を続けている国内の大学があってこそできる計画である。まさに VERA 計画の後継にふさわしい計画といえる。

国内の科学研究においては、国内電波望遠鏡によるかにパルサーのジャイアントパルスおよびマグネターアウトバーストの多周波電波観測（三上ら [1]、榎戸ら、Eie ら）および VLBI 観測の経験（岳藤ら [2]、赤堀ら）があるとともに、時刻系変換・消分散処理・パルス検出・ソフトウェアパルサーゲートといった基本的な解析能力は獲得している（ただし改善の余地は多分に残る）。また海外の望遠鏡（Parkes や MWA）を使ったパルサーや FRB データの解析も進む（高橋ら）。

国内の技術開発においては、CXK 帯の 3 バンド広帯域フィードの概念設計と試作は達成（長谷川ら学会講演）しており、現 VERA の C 帯受信機との換装は現実的である。同周波数帯の高感度化については、JVN の C/X 帯同時受信システムによる運用実績をもとに検討が可能である。PLS 帯についても給電部は CXK 帯のスケールアップをベースに検討が可能である。RFI 対策としても 3 バンド高温超伝導フィルタは水沢局・石垣局で試験運用段階にあり、4 バンド高温超伝導フィルタは概念設計がほぼ終了し試作を開始している。同帯域の電波環境調査も進行中。

国内の天文関連コミュニティ（他波長・理論など）の経験

国内におけるコンパクト天体の理論的研究（特に、パルサー磁気圏の理論研究（柴田、木坂など）、FRB の起源に関する理論研究（戸谷、井岡、檜山、山崎など）や、可視・近赤外（前田など）、X 線・ガンマ線（榎戸、中川など）など多波長にわたる観測的研究が盛んに行われている。本研究の推進によって電波に留まらない多機関との横断的な研究協力が期待できる（appendix STM 参照）。

必要な性能について

高角度分解能を実現するグローバルスケールのアレイよりも機動性が高く、周波数カバレッジが広く、高い感度を有するアレイの構築が最重要である（詳細は appendix 参照）。

既存の装置で実現可能か？

マイクロクエーサーの強度モニターは山口干渉計や JVN を用いて準備研究が可能である。位置天文観測は若い中性子星のアウトバースト、および限られた数のマイクロクエーサー/若い中性子星の定常パルスについて EAVN の C 帯による準備研究が可能である。ただし位置天文観測では天馬局基線の位相補償観測が必須である。また放射機構に関する系統的な研究の実施は難しい。

既存 VLBI アレイのアップグレードで実現可能か？

ブラックホールの系統的な研究、ならびに中性子星アウトバーストの位置天文観測および両偏波広帯域放射観測は、現 VERA への C/X/K 帯高感度同時受信システムの開発・搭載、大学望遠鏡への同受信システムもしくは C/X 帯 2GHz 帯域観測システムの開発・搭載して初めて実現可能である。本アップグレードにより、周波数カバレッジの大幅な増強と高感度化により EAVN の機能強化への大きな貢献、SKA1/ngVLA などとも広く観測周波数を共有するアレイの実現が期待できる。

計画されている大型装置もしくは新しい装置が必要か？

中性子星の定常電波放射位置天文観測および両偏波広帯域放射観測は、現 VERA への P/L/S 帯高感度同時受信システムの開発・搭載、大学望遠鏡への同受信システムもしくは L/S 帯 2GHz 帯域観測システムの開発・搭載して初めて実現可能である。C/X/K 帯のシステムの維持、もしくは Q/W 帯との共存の実現には受信部を最適化するために、既存望遠鏡の大幅な改修もしくは新しい望遠鏡の設計が必要になる。近傍系外超新星残骸における誕生後 100 年を切る非常に若い中性子星からの電波放射の直接検出、あるいは将来に中性子星の観測対象の数を増やしていくためには、大感度の VLBI 局の参加が必要になる。SKA1 や SKA2/ngVLA を待つ必要がある。

推進計画**短期：～2022 年 3 月（EAVN を用いた準備研究・開発準備）**

科学観測：EAVN C 帯によるマグネターアウトバーストの追観測実施、GRS 1915+105 を含む 3 天体のマイクロクエーサーに対し山口干渉計および JVN C/X 帯によるモニターと時間変動スケールの検証および EAVN C 帯による撮像観測を実施する。

技術および装置の開発：EAVN/JVN による低周波・少数基線アストロメトリの精度検証、C 帯および国内望遠鏡 L/S 帯 VLBI におけるパルサー定常放射の観測と解析技術の蓄積、VERA C/X/K 帯搭載検討および JVN の 8Gbps 化の設計、UHF 広帯域受信システムの電磁解計算と試作・開発費用の見積もり・高温超伝導フィルターの概念設計および試作する（名古屋大、東北大と協調）。

組織：この期間に、本研究を志す大学院生の勧誘と研究を実施し、第 1 世代の若手研究者を育成する。

中期：第4期中期計画（～2027年度）

科学観測：国内を中心としたC/X/K帯同時受信VLBIによる位置天文観測による距離・3次元運動速度の計測とSNRとの対応付けおよびパルスタイミング観測による減速指数測定（年間850時間：中性子星450時間、マイクロクエーサー400時間）、およびマイクロクエーサーアウトバースト時の集中観測（年間100時間）を実施する。ただし、C/X/K帯同時受信システムの開発・搭載までは、観測対象数、観測精度等が限定されることを許容し、EAVN C帯による発現後数十年以内の検出可能SNRの探査（8天体）と国内大型望遠鏡による観測（系内外の中性子星における定常・突発放射）、山口干涉計およびJVN C/X帯によるGRS1915+105と2天体のモニター継続・時間変動スケールの検証とX線・可視近赤外を中心とした他波長との連携観測を実施していく。

技術および装置の開発：国内望遠鏡L/S帯VLBIにおけるパルサー定常放射の観測と解析技術の蓄積、順次VERA C/X/K帯同時受信システム開発・搭載、JVNのC/X（/K）帯2GHz帯域化の検討・改修、P/L/S広帯域受信システム試作機開発・搭載試験（C/X/Kスケール10倍）

組織：この期間に、本研究を志す大学院生の勧誘と育成を加速し、第2世代・第3世代の若手研究者を育成し、知識の蓄積と継承を本格化させる。世界を見据えるコンパクト天体の電波観測グループの形成を進める。

長期：2028年度以降

科学観測：国内を中心としたPLSCXK6バンド同時観測システムによりサイエンスをさらに発展させる。コンパクト星位置天文観測は定常化され、ブラックホールの研究では親SNRの有無に関する系統的な調査が実現できる。中性子星では系外中性子星を含めた幅広い年代の中性子星、多くのパルサー定常放射も観測対象に加わった系統的な調査が実現され自転周期・周期変化率・減衰指数の高精度計測が実現される。すべての研究で世界最高の6バンド同時スペクトル計測でスペクトル形状とその時間進化が分かり、放射起源に新しい示唆を獲得できる。例えばBHジェット発生機構の系統的な調査が実現される。中性子星では放射源たる荷電粒子の生成過程、空間的分布と時間変化、FRBとの類似性と相違、放射場のQEDやQCD理論との整合性の調査ができる。さらにはファラデーモグラフィの実用化による磁場視線断層解析も可能になる。これらの研究推進は、将来大型装置による研究へ展開（SKA/ngVLA?への接続）されていく。

組織：この頃には、世界を見据えるコンパクト天体の電波観測グループの形成を達成する。

S2 計画概要：地球・測地 WG

「広帯域 VLBI を用いたマイクロ秒角精度の章動計測：地球のコアの運動を探る」

VLBI 将来計画 WG：地球・測地 WG

研究の意義

従来の研究状況・問題点

地球の自由章動を代表する流体核自由章動 (FCN) や内核自由章動 (FICN) (Appendix 1) は、地球内部のコアの歳差・章動の回転トルクがマントル境界での相互作用によってマントル側に伝わる現象を表すパラメータである。このパラメータには流体核や内核の扁平率、密度、マントルとの相対運動、流体核の内部運動、マントル—流体核-内核の境界条件等が関与しており、流体核や内核の形状や運動がマントルとは異なる事を示す手掛かりである。しかし、これら自由章動の詳細は殆ど明らかにされていない。原因は予測モデル、地球内部構造モデルや応力伝達過程。章動角測定精度の問題、等多数である。現在は FCN の長期振幅変動が漸く明らかになった状況。振幅の変化原因や消散過程は未解決である。また FICN は未検出であり、これらの根本原因は絶対的な章動計測精度不足である。GGOS (全球統合測地観測システム、測地学の基本的な三つの観測量、地球の幾何学的形状、重力場、地球回転、を統合して高精度に観測し、その変動をモニターするとともに、すべての地球関連科学とその応用分野にとっての基盤となるグローバルな基準系を与え維持することを大きな目的とする) の一環として、慣性系と地球基準座標系の結合や、地球内部の運動や熱移動に関わる情報を高精度で取得することが目的となる。

何を明らかにするのか？

地球・惑星のコアの形状や回転運動、コアの組成や構造と回転やマントルへの伝達を知るためのパラメータとして、FCN や FICN の検出やリバイズ。その検出のためのマイクロ秒角 (μas) レベルでの空間角度測定方法の探求。

達成するための手段

1. 目標パラメータ検出に最適化した VLBI 観測
2. 広帯域、high rate sampling、ミリ波のコンパクト天体による VLBI 遅延計測
3. 1 ピコ秒 (ps) より小さい白色雑音誤差精度での遅延計測とその取得された遅延観測値の安定性、信頼性の確保
4. 観測・解析機器の 100 フェムト秒 (fs) の計測能力と信頼性の担保

VLBI は我々が所有する計測手段の中で歳差と章動の直接計測が出来る唯一の手段であり (図 4)、今後にもこの計測性能向上を目指すことが必要である。

Parameter	VLBI	GNSS	DORIS	SLR	LLR	Altimetry
CRF (Quasar)	○					
Nutation, Precession	○	△		△	○	
Pole wobble	○	○	○	○	○	
UT1	○					
Length of Day	△	○	○	○	○	
TRF	○	○	○	○	○	
Geocenter		○	○	○		○
Gravitation field		○	○	○	△	○
Ionosphere	○	○	○			○
Troposphere	○	○	○			○

○：測定可能、△：相対値の測定が可能

図 4: 各宇宙測地技術と測定されるパラメータの特性。GNSS: Global Navigation Satellite System、DORIS: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite、SLR: Satellite Laser Ranging、LLR: Lunar Laser Ranging。歳差・章動は CRF の中で定義された黄道面に対する地軸の傾きとその変化を示すパラメータであり、CRF と太陽系基準システムの中で表され、VLBI と LLR が直接計測を可能とする。

期待される学問的インパクト・周辺分野への波及効果

1. Matheus (2002) 等で予測された FICN の検出およびコアの形状や運動についてモデルとの合致性を検証（章動角計測の精度向上とカップリングする慣性系の再定義、等、他分野に波及）
2. グローバル、人工衛星測地観測、他・地球外惑星科学との関わり
 - 地球重心の移動をモニタできる SLR や重力場観測衛星によるコアの振動と、VLBI による自由章動との関わり合いを検討。
 - 流体コアの質量移動や MCB、ICB の変形等、地球深部の質量移動情報を得るためには、地上質量移動情報の少ない人工衛星による重力観測が適していると考えられる（重力系や周波数標準を載せた人工衛星による重力計測等）。
 - 流体核の内部運動に関与する地磁気との関連性、内核の形成進化と運動の進化、地球の冷却機構や熱移動、火成活動、固有磁場（流体核があるから磁場の励起があることは地球の中での理論）。地磁気の励起、変動と流体核の運動の関係。双極子地球磁場の逆転に付随する自由章動のモード変化はあるか、地球外惑星・衛星の固有磁場の変動とその天体の回転の詳細計測への展開を期待。
 - 自由章動にはコアとマンツルの形状、密度、粘弾性係数の違いが、潮汐応答の違いとして見えている。自由章動の存在の確認は、惑星や衛星の構造や組成が層によって異なる事の確認へとつながり、惑星内部構造の熱的・相構造的・応力的進化過程を構築する上で、それぞれの構造の形成要因を考える手掛かりとなる。

なにをどこまでやるのか？

まずは、国内基線を使った実験と性能評価。エラーバジェットの詳細検討と、それに伴いエラーの縮退を目指すための方法論の確立を進める。観測時間は、年間 10 回ほどを継続し、

数年の継続で統計的にその成果の計測能力を判断することが第一の目標。次に、国内での試験結果に従って、誤差較正手法の確立、国際ネットへの観測手法の紹介と、国際観測への展開を目指し、遅延観測値の標準偏差を数ピコ秒まで達成させることを目標とする。

新規性

1. 自由章動の詳細の解明：先ずは $10\mu\text{as}$ 、つまり現在の 4-5 倍の精度より良い精度で自由章動係数の時間変化を見られるような計測手段の確立を目標とする。章動計測によって地球のコアの運動や境界応力分布に関わる情報を取得。
2. 空間角度精密測定方法の確立：極限まで熱雑音誤差を下げることで、さらに付加誤差の発生源を検討して、その較正を行うこと。周波数帯を数 GHz から 50GHz 帯まで広げる。数ピコ秒の安定した遅延計測から見える VLBI データの新規性の検証。
3. 精度向上のためには VLBI のトータルパッケージとしての性能向上が必要。観測装置への要求としては、総合的視点からアプローチを行う。帯域幅、周波数・位相安定性や再現性、クロックの安定性、相関器の演算能力と有効演算精度、信頼性の向上。較正方法（大気プロファイリング、等）で、トータル誤差が標準偏差で数 10 ps 未満（現在の 4~5 倍の精度）、最終的には 1 ps になることを期待。

日本の（VLBI 研究の）独自性・優位性

我々（VLBI コミュニティ）の経験

EOP 計測は国土地理院で実施。主に UT1 の計測が主である。VGOS との協力体制。石岡アンテナなど現世代の国際観測での計測精度を超えるための筋立て、VGOS の次の時空計測への展望。次世代時空計測要求に対応する精度（確度）を目指すための組織が必要。

国内の天文関連コミュニティ（他波長・理論など）の経験

惑星・月の FCN の研究は澳門大の原田が理論研究を実施。原田は JAXA に所属中に火星の FCN の計測の価値を報告している。その他、月や火星の部分溶融と、その天体の FCN への影響についてシミュレーションを実行。章動理論は国立天文台でも行われていた。

先行研究

VGOS も EOP のリバイズがターゲットの一つである。本研究課題との共通目標ではあるが、アプローチが異なり、此方は高周波による観測源の安定性の効果、さらなる計測の安定性を目指すことも期待。高周波、ミリ波、サブミリ波での相対論的時空。時刻計測として、光格子時計の相対論重力効果測定、干渉計への応用。時間の再定義から、G.A. 等の影響からつながる、慣性系の再定義、空間の再定義へ向かう時空計測研究、相対論測地の一つ。

必要な性能について

1. パラメータ測定精度向上のためには VLBI のトータルパッケージとしての性能向上が必要 (Appendix 3)。帯域幅、周波数・位相安定性や再現性、クロックの安定性、相関器の演算能力と有効演算精度、演算の信頼性の向上。キャリブレーション方法 (大気輻射プロファイリング、等) で、ポストフィット遅延残差の non-biased standard deviation (SD) が 10 ps 未満 (現在の 4-5 倍の精度) になること。
2. 観測周波数に応じたフリンジ位相の不確定性を除去できるだけの周波数揺らぎをキャンセルできる出来る観測・解析手段。位相揺らぎとしては、特に数分から数 10 時間のスパンの中にあるランダムウォークや不定バイアス成分を対象とする (要求性能の詳細と具体的な計画との関わりは Appendix 2 に記載)。

推進計画

- 先ずは、SD が 10 ps を切る事。現在の 12-15 ps (Appendix 4) の安定性調査。更に白色雑音誤差を縮小して将来的には数ピコ秒まで到達することが目標。
- 最初の章動角計測精度目標は VERA ネットワークで $50\mu\text{as}$ 。このあたりで FCN の章動角の時間変化の詳細が追尾可能になる。次の目標としては $10\mu\text{as}$ 以内の角度計測精度達成が国際基線で得られることが目標 (注：空間角度計測能力は基線長に比例する (Appendix 5))。この精度で、FCN の振幅の時間変化が明らかになり、FICN の振幅が一定ならば、長期間の章動角計測結果から FICN の成分が見え始めるかもしれない。最終的には基線を月-地球系まで広げることが達成できないと、FICN の詳細は見えない。

短期：～2022 年 3 月

- 観測天体の確保、検出感度安定性調査。
- 超広帯域スペクトルアナライザ、大気輻射プロファイラを用いた大気遅延構造推定に関する準備研究とその性能評価。
- 現状の広帯域測地 VLBI から得られる解の精度と安定性の確認、広帯域 VLBI 観測装置の現状の性能確認。遅延計測精度としては SD が 10 ps を切れる見込みを確認。

中期：第 4 期中期計画 (～2027 年度)

- 国内ネットワークと広帯域記録を用いた、章動観測の基礎実験。
- 新規相関器開発と、その性能の評価。
- 超広帯域スペクトルアナライザ、大気輻射プロファイラを用いた大気遅延構造の推定補法の確立と、観測による評価。
- 大気遅延、相関器付加誤差などを補正した遅延推定から得られる測地解の安定性調査。

- 光格子時計を用いて、重力変化と時刻・周波数追尾を VLBI へ適用、原子時と EOP の同期、相対論実計測地の適用、時刻比較等の時空計測の性能検討。
- 解の超高安定化に向けた取り組み、新しい周波数標準・時刻標準の時空計測へのアプリ。遅延計測精度は SD で 10 ps を切り、数 ps に接近することが理想。
- 現状の章動角測定精度との比較を行い、国内基線、国際基線での章動観測の将来性を確認する。
- 国際観測網への展開準備（計測方法が VLBI 計測パラメータの精度を向上させる手段の一つとして、認知されること）。

長期：2028 年度以降

- 人工衛星、月ミッション等を使った VLBI 観測を用いて、時空計測実験を行うための準備研究
- 新しい周波数基準の適用、新相関器開発と効果確認、さらなる広帯域化。
- VLBI から次世代時空計測手法への展開を模索する。
- 地球内部構造探査、太陽系惑星衛星のコアの運動計測（光、素粒子等測定用媒質を移行、太陽系へと field を拡張）。
- SKA、パルサー時刻同期への展開。
- 重力観測衛星と、章動計測の同期、太陽系内人工天体間コロケーション、地球上に展開される光格子時計を用いた時空系測研究 (space tie)。
- μas の精度での章動角計測、時空計測に関連する研究テーマについては Appendix 6 に提示される。

S3 計画概要：星 WG

「VLBIで解明する星の誕生と終焉の様子」

VLBI 将来計画 WG：星 WG

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 [3]。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 [4, 5, 6]。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合理論の確立の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., 7, 8, 9, 10]、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 [11] 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 [12, 13]。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 [14] 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メーザー成分の精密同定を目指す。

2. **メーザーフレアを通じた質量降着機構の解明**：近年、6.7 GHz 帯メタノールメーザーでの 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 [15, 16, 17]。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メ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、メーザーの強度・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査**：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) 領域の大規模探査を行う。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査し、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渉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なく、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[18, 19, 20, 21]、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[15, 22, 17]。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[23]。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[14, 4, 5]。さらに、mJyレベルの連続波検出が可能な1基線干渉計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新設(8 GHzで100 km、22 GHzで30 km)も検討したい。茨城/山口干渉計では(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)干渉計・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[19, 20]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 Msun	up to 20-30 Msun ?	ZAMS
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	$10^5 - 10^6$ HCHII - UCHII 円盤散逸



図 5: 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輪廻（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 [24]。

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、星周で励起されるレーザー放射を対象とした VLB 観測が重要な鍵を握る。星周レーザーについては、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、レーザースポット群の見かけの振る舞いを正確に把握することが、レ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 測定は、可視光による Gaia 衛星に対して銀河系円盤・中心領域の測定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

星周レーザーは、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、単一又は少数のレーザー輝線に対する個別で散発的な監視観測に留まり、レ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 レーザーを対象としたものに限定され (20 天体程度)、SiO レ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 レーザーを伴う 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。

- レ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。

- $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}$ ($J = 1 \rightarrow 0, 2 \rightarrow 1$) メーザー源の測量と撮像を兼ねた VLBI モニター観測
- $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}/\text{OH}$ 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。老齢星は孤立・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であって、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 $6 \text{ hr} \times 18 \text{ 回} \times 1.5$ (高頻度モニターによる増分) $\times 20 \text{ 星} = 3,240 \text{ hr}$ 。
- 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 $5 \text{ hr} \times 8 \text{ 回} \times 30 \text{ 星} = 1,200 \text{ hr}$ 。

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ら）。
- 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/動画合成実現への道筋を付ける。

S4 計画概要：銀河 WG

「VLBIで解明する銀河と超巨大ブラックホールの形成と進化」

VLBI 将来計画 WG：銀河 WG

研究の意義

従来の研究状況・問題点

銀河は宇宙を構成する最も重要な天体の1つであり、人類も天の川銀河の中に住んでいる。今ではほぼ全ての銀河の中心には巨大ブラックホール (SMBH) が存在し、一部は活動銀河中心核 (AGN) として重力エネルギーを周囲に解放し、銀河の形成・宇宙論的進化にも大きな影響を及ぼしていると考えられている。実際、近年の EHT/ミリ波 VLBI による M87 ブラックホールシャドウの撮影は長年の仮説であった AGN の SMBH パラダイムを確実なものとした。しかしながら、我々は自らが住む天の川銀河の基本構造・形状さえ未だ完全には理解していない。系外に目を向けると、AGN の SMBH パラダイムは M87 以外の銀河中心でも本当に正しいのだろうか？ その場合、AGN/SMBH の活動性の強弱や多様性を支配する基本パラメータは何だろうか？ そして究極的には銀河や SMBH はいつ、いかにして誕生・形成し、どのような相互作用を経て互いに進化・成長してきたのだろうか？ 以上の問いは天文学全体が長年に渡り共有する根源的問いであるとともに、次の 10-20 年の天文学において取り組むべき最重要課題といえよう。VLBI はこれらの根源的問題に対し、他の観測装置の追従を許さない圧倒的空間分解能を武器にアプローチする。

何を明らかにするのか？

我々は以下に示す 3 つの柱を大テーマとして定義し、上記の謎解明に取り組む。

- 柱 1：「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」
- 柱 2：「活動銀河を支配するキーパラメータの探査」
- 柱 3：「銀河と SMBH の共進化と宇宙論的進化の現場の可視化」

■ 柱 1：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

達成するための手段

もっとも近い銀河である銀河系と超巨大ブラックホール Sgr A* を観測する。EAVN の銀河系中心アストロメトリから SKA-VLBI の南天アストロメトリへ発展する。具体的には以下のサブテーマにブレイクダウンして研究を展開する (各詳細は Appendix)。

- **銀河定数決定**：Sgr A*の年周視差・固有運動計測から銀河系の基本尺度である銀河定数 R_0 と Θ_0 を直接決定する。Sgr A*の運動を精密測定し、銀河中心アストロメトリの位置基準とする。
- **中間質量ブラックホール (IMBH) 探査**：Sgr A*の固有運動残差からふらつきと加速を検出し、Sgr A*周囲の暗黒質量を解明する。VERA/VLBA(小山、Reidら)とVLT/keckが競うIMBH質量上限(Sgr A*から0.01 pcで $3 \times 10^4 M_\odot$ 以下)をアップデートする。
- **Central Molecular Zone (CMZ) 軌道計測**：理論及び位置視線速度図が示唆するCMZの楕円軌道X1/X2軌道をメーザー源とIMBH候補のアストロメトリによる3次元速度で調べる。
- **無バイアスサーベイ**：Sgr A*周囲1平方度から新たな観測対象のメーザー源とIMBH候補を発見する。
- **南天アストロメトリ**：SKA-VLBIで銀河系中心を含む南天領域のアストロメトリを行う。

期待される学問的インパクト・周辺分野への波及効果

史上初のSgr A*年周視差計測から銀河定数を3%で決定する。本計画のSgr A*とこれまでのVERA銀河系アストロメトリの結果($R_0 = 7.92$ kpc、 $\Theta_0 = 227$ km s⁻¹)を合わせてIAU推奨値の改訂を目指す。Sgr A*の目標視差精度4マイクロ秒角はこれまでの視差計測の中で世界最高精度となる。「超重要天体Sgr A*で世界最高精度達成」という実績は次世代大型プロジェクトを推進する上で強力なアピールとなるだろう。IMBHの質量制限とCMZの3次元軌道計測からは超巨大ブラックホールSgr A*への質量降着過程の解明が期待される。

固有運動計測からSgr A*自身の特異運動がないことがわかれば、局所静止基準(LSR)に対する太陽系の運動(太陽運動)が正確に得られる。特に円盤に対し鉛直方向(北銀極方向)は直接測定となる。Gaia/JASMINEと合わせることで銀河回転と太陽運動の両方の精密決定が可能となる。

なにをどこまでやるのか？

2022年から2027年までEAVNでSgr A*とCMZのメーザー源/IMBH候補10天体を観測する。これまでのVERA/VLBAの銀河系アストロメトリとVLT/keckのS2軌道観測による R_0 の推定値には3%(約200 pc)の系統誤差が見られ論争となっている。より信頼度の高い直接測定であるSgr A*の視差で R_0 を3%まで追い込み、この論争に決定打を与える。

新規性

本計画では新しく86GHzでSgr A*の相対VLBI観測に挑戦する。星間散乱の影響が少ない86GHzは従来の43GHzに比べ位置測定精度が2倍向上する。これによりSgr A*の視差、ふらつき、加速の初検出が期待される。CMZのアストロメトリ結果はこれまでSgr B2の1天体のみであった。EAVNの高感度により観測対象が1Jyのメーザー源10天体まで増加する。複数天体でかつ3次元速度でCMZのX1/X2楕円軌道を調べることは初めての試みとなる。

日本の（VLBI研究の）独自性・優位性

我々（VLBIコミュニティ）の経験

VERA で 10 マイクロ秒角のアstrometry に必要な装置、観測、相関処理、解析の全システムを構築した経験がある。20 年間アstrometry 観測を積み上げ、銀河系円盤の 100 天体を超えるレーザー源の VERA カタログを出版し、銀河定数を高精度で推定してきた。これまでの VERA によるグローバルな銀河回転測定で得た Θ_0 と本計画の Sgr A* の固有運動を比較することで Sgr A* の特異運動速度（銀河回転の力学的中心に対する運動）を推定できるなど研究の連続性が強い。

国内の天文関連コミュニティ（他波長・理論など）の経験

JASMINE では赤外線で銀河中心を含むバルジのアstrometry を計画している。星 WG でもバルジの SiO レーザーのアstrometry を計画している。CMZ の楕円軌道 X1/X2 は銀河系の棒状構造が起源と考えられており、これらのバルジのアstrometry 計画と関連が強い。極限天体 WG が計画する系内ブラックホールが銀河中心で発見された場合、CMZ 軌道や Sgr A* 形成過程を調べる上で非常に重要な観測対象となる。

先行研究

VERA で Sgr A* と CMZ の星形成領域 Sgr B2 を先行して観測してきた（小山ら、酒井ら）。Sgr A* では VLBA より 3 倍高い世界最高の位置測定精度を達成し、視差が見えつつある。Sgr B2 では水レーザー内部運動を丹念に取り除くことで、固有運動から X2 軌道運動が見えつつある。このように日本は銀河中心のアstrometry 分野で世界を先行している。

必要な性能について

既存の装置で実現可能か？

Sgr A* の目標視差精度 4 マイクロ秒角には 1 回の観測の位置精度 40 マイクロ秒角と 100 回の観測（3 月 10 回と 9 月 10 回を 5 年間）が必要となる。既存の VERA 43GHz では低仰角の Sgr A* において位置精度 40 マイクロ秒角が実現できない。

既存 VLBI アレイのアップグレードで実現可能か？

位置精度 40 マイクロ秒角は Sgr A* が 86 GHz で検出できる最大基線長 3600 km で初めて到達できる。EAVN の 86GHz 化、広帯域 16Gbps 化、位相補償手法確立の 3 つのアップグレードで達成できる。VERA に新しく 86GHz 受信機の搭載が必要となる。低仰角の銀河中心アstrometry において最も重要な補正は天頂大気遅延である。VERA に水蒸気ラジオメータを導入し、従来の GPS、気象庁客観解析データ、測地観測による補正と合わせて、現状の天頂大気遅延精度 2 センチを突破しミリ精度に到達できれば、観測精度が著しく向上する。前述の基線長の延長と大気遅延補正の向上をセットで進めることが重要となる。

計画されている大型装置もしくは新しい装置が必要か？

銀河定数を 3% より高精度で求める場合、SKA-VLBI で Sgr A* と南天のアstrometry を進める必要がある。これは天体数で改善する統計誤差よりモデル依存の系統誤差が大きくなりつつあるためである。銀河系動力学のモデルの精密化が必要で、単に円盤部の天体数を増やすだけでなく、南天で高仰角に昇る銀河中心やバー/バルジ領域の観測を重点的に進める必要がある。

推進計画

短期：～2022 年 3 月

Sgr A* は従来の VERA 43GHz の観測を 2022 年 3 月まで継続する。CMZ はFRINGE チェック観測を通じてターゲットリストを作成する。柱 2 と同様に EAVN の 86GHz 化と広帯域化を立ち上げる。加えて EAVN の位相補償を立ち上げる。

中期：第 4 期中期計画（～2027 年度）

EAVN の 86GHz で SgrA* を 5 年間で 100 回、600 時間観測する。EAVN の 22GHz で CMZ を 5 年間で 10 天体 10 回、600 時間観測する。

長期：2028 年度以降

SKA-VLBI へ発展する。

■ 柱 2：活動銀河を支配するキーパラメータの探査

達成するための手段

ミリ波 VERA/EAVN による高頻度・広帯域・両偏波観測を軸として、将来的にミリ波スペース VLBI へと展開し、「BH スピン」「磁場」「質量降着率」「AGN 周辺環境」というキーパラメータおよびそれらの相互関連を明らかにする。具体的には以下のサブテーマにブレイクダウンして研究を展開する（各詳細は Appendix）。

- **M87 ジェットモニター**：光子リングとジェットの接続領域を 86GHz でモニター観測してジェット形成メカニズムを解明する。
- **BH シャドー微細構造**：光子リングと重力赤方偏移による 2 重リングの検出により強重力場での一般相対論現象を確認し、その構造からスピンの計測を行う。
- **第 2,3 の BH シャドー撮影**：銀河中心エンジンの普遍性・多様性を調査。質量・降着率・スピンなどのパラメータが活動銀河の多様性に及ぼす影響を調査する。
- **ブレイザー高エネルギー放射領域**：高感度な国内干渉計による近傍 TeV ブレイザーの強度変動モニターに加え、3mm 帯の VLBI 撮像による高エネルギー放射領域の直接モニターを実施。

- **AGN トーラス最内縁部の探査**： cmVLBI や ALMA によってトーラス構造が示唆されている近傍 AGN (NGC1052, 3C84, NGC1068 等) を対象に、86GHz VLBI による分子ガス吸収線観測を行い (CO, HCN, HCO⁺ など)、subpc スケールで天体構造を空間分解してトーラス・核周円盤内縁の物理や、インフロー/アウトフローの切り分けを行う。
- **急成長中の SMBH の核周構造**： 狭輝線セイファート 1 型銀河 (NLSy1) をはじめとする高質量降着率 AGN について、超広帯域で両偏波観測によりファラデー回転量度 (RM) をインバンド (22GHz 帯または 43GHz 帯) で精密計測する。クエーサーや BLLac 等降着率の低い BH と比較することで急成長中の AGN の pc/subpc スケール周辺環境を浮き彫りにする。
- **86GHz 全天サーベイ**： MASK プロジェクト (現在 KVN で行われている 86GHz 帯を含むミリ波 AGN サーベイ) を VERA や野辺山を含む EAVN に拡張し、1000 天体規模の 86GHz AGN カタログを作成し、全天でミリ波における AGN の時間変動を調査する。

期待される学問的インパクト・周辺分野への波及効果

AGN/SMBH の活動性や多様性をもたらす内的・外的キーパラメータ (内的：BH スピン、BH 質量降着率、BH 磁場等; 外的：核周物質の量や運動、トーラス構造・形状など周辺環境) を直接空間分解かつ多角的に制限し、AGN や銀河進化の歴史を紐解く。BH からのエネルギー抽出機構という、天体物理学における最大の謎が解明される。更に、画像に基づく一般相対論の検証を行うことで、天文学から基礎物理理論を実証可能になる。

なにをどこまでやるのか？

[M87] 地上 86GHz 高頻度観測および 230/350GHz スペース VLBI により、シャドーとジェット of 接続領域をモニターし、両者の構造変動の相関を調べることでジェット形成メカニズムを解明する。[BH シャドー撮影拡張] 最大で近傍 10 天体程度の SMBH シャドー画像を取得する。[ブレーザー] $10^3\text{--}10^4 R_s$ 領域の挙動を biweekly~monthly で撮像モニターし高エネルギー電磁波帯モニター観測の結果と比較する。ニュートリノイベント後の他波長観測と比較可能な時間分解能の光度曲線および撮像データの取得。[AGN トーラス] ~ 10 天体規模で吸収線観測を行い、吸収線オパシティの空間分布を明らかにする。VLBI 観測によって同時に得るジェットの形状や、ALMA による CND/Torus の構造・運動状態などの情報を含め、トーラス内縁の物理に迫る。長期的にはオパシティの時間変動も調査し、トーラスのダイナミクスにも踏み込む。[急成長 SMBH] 先行研究で蓄積されたクエーサーや BLLac の RM サンプルと統計的比較が可能になるよう、100 天体規模で NLSy1 のサーベイ実施。[86GHz サーベイ] 1000 天体規模のミリ波 AGN カタログを作成する。

新規性

「ミリ波 VLBI でこれまでの約 10 倍の時間分解能」で SMBH 周辺の動的構造を撮像モニター (EAVN 86GHz)。「ミリ波でスペース」という前人未到の超高空間分解能で AGN セントラルエンジンを可視化 (スペース 230/350GHz)。広帯域 in-band 偏光分光観測という新た

なアプローチを駆使することで、未だ理解が進んでいない高質量降着率 SMBH の物理状態・周辺構造にメスを入れることができる (VERA/EAVN 広帯域両偏波)。これらを推進するにあたり、ミリ波は十分な感度を得ることが重要なため、特に 22/43/86GHz 帯においては野辺山 45m 鏡の活用が大変重要である。

日本の (VLBI 研究の) 独自性・優位性

我々 (VLBI コミュニティ) の経験

M87 をはじめとする AGN ジェットの観測的研究。スペース VLBI (VSOP) の実績。EHT をはじめとするミリ波 VLBI 国際プロジェクトへの貢献。22/43/86 GHz 帯においては大口径ミリ波鏡である野辺山 45m を用いた VLBI を推進。

国内の天文関連コミュニティ (他波長・理論など) の経験

アテルイ II 等を用いた磁気流体数値シミュレーション (川島、中村、当真、大須賀ら他) や、多波長 SED モデリング (紀、嶺重ら) をはじめとする、BH シャドー・降着流・ジェットに関する多様な理論的研究。X 線 (ASCA, Suzaku, Hitomi, XRISM) 国内グループによる BH 降着流の観測。可視光～ガンマ線・高エネルギーニュートリノ (Kanata, Fermi, MAGIC, CTA, IceCube) 等多波長・マルチメッセンジャー国内グループによるジェット高エネルギー放射領域・磁場構造の観測。ALMA による AGN 核周領域の観測。

先行研究

VSOP/VERA/KaVA/EAVN/VLBA を用いた M87 をはじめとする様々な AGN ジェット及び SMBH 周辺構造の観測的研究 (論文リスト参照)。EHT (地上) による M87BH シャドー撮影。

必要な性能について

本柱ではいずれもミリ波 (22/43/86/230/350GHz) がサイエンス遂行のカギである。その他必要な観測性能は各サブテーマによって異なるため、詳細は STM を参照。

推進計画

短期：～2022 年 3 月

研究：EAVN 22/43GHz および JVN/山口干渉計による M87 やガンマ線ブレーザーの高頻度モニター継続。VERA 22/43GHz 16Gbps による NLSy1 複数天体の in-band RM 系統調査の開始。KVN 86GHz による AGN 核周物質吸収線観測。

開発・試験：VERA 32Gbps 広帯域両偏波試験。KVN+野辺山 45m 86GHz コミッショニング。VERA86GHz 化 WG 立ち上げ。ミリ波スペース VLBI ISAS リサーチグループ発足、ミッション成立性の検討。

中期：第4期中期計画（～2027年度）

研究：EAVN 86GHz による重要プログラムを本格展開（M87 ジェット初期加速領域・ブレイザーの高頻度モニター；3mm ソースサーベイ；CND 吸収線高感度観測）。VERA/EAVN22/43GHz 16/32Gbps による広帯域 in-band RM 大規模サーベイ。XRISM や CTA, IceCube 等 SMBH 多波長連携の促進。

開発・試験：22/43GHz 帯 EAVN 16/32Gbps 超広帯域両偏波システム整備。86GHz 帯 EAVN 観測網の定常化（VERA 86GHz 実装, GLT/JCMT/ATCA との共同観測体制確立）。ISAS WG を経てミリ波スペースミッション提案・プリプロジェクト化。

長期：2028 年度以降

[地上 86G サイエンス] スペースミリ波サイエンスへ発展的接続。[シャドーサイエンス] ミリ波スペース VLBI 衛星の打ち上げ、ターゲット観測実施。[AGN 核周構造・急成長 SMBH サイエンス] SKA-VLBI や ngVLA を用いた観測へ発展的移行。[ブレイザー/マルチメッセンジャーサイエンス] CTA/IceCube 等との合同キャンペーン体制の確立・定常化。

■ 柱3：銀河と SMBH の共進化および宇宙論的進化の現場の可視化**達成するための手段**

センチ波帯での超高感度 VLBI 観測（EAVN+FAST またはグローバル VLBI）を軸に、将来的には SKA-VLBI や ngVLA、スペース SKA を用いた研究につなげる。具体的には以下のサブテーマにブレイクダウンして研究を展開する（各詳細は Appendix）。

- **High-z クエーサー：**宇宙誕生後 10 億年以内のクエーサー/AGN の中心核やモルフォロジーを空間分解し、近傍 AGN の構造と比較することで SMBH の形成・進化メカニズムを明らかにする。
- **CND-startburst connection：**AGN 核周円盤（CND）/Torus における超新星爆発起源の電波放射を撮像し、CND の質量降着における角運動量輸送メカニズムに対する超新星爆発乱流の影響を系統的に調査する。
- **ホットスポット空間分解：**銀河中心エンジンからのエネルギーが銀河間空間に作用する現場として、電波ローブホットスポットの内部構造を空間分解し、高エネルギー粒子加速モデルや AGN フィードバックモデルの根拠を実証する。
- **ジェット微細構造：**ジェット層構造やリコリメーションショック領域の内部構造を空間分解し、中心エンジンからのポインティングエネルギーが力学エネルギー等へ変換されるメカニズムや星間空間との相互作用を解明する。

期待される学問的インパクト・周辺分野への波及効果

- **High- z クエーサー**：宇宙誕生後再電離期から 10 億年以内の宇宙を pc スケールという圧倒的な空間スケールで可視化することで、SMBH や銀河の誕生・形成・進化シナリオ特定に強い制限を与えることが期待される。AGN フィードバックや衝撃波の現場を高感度・高解像度で可視化することで、AGN や銀河進化、粒子加速機構の解明を促す。
- **CND-starburst connection**：CND/Torus スケールのガスを降着させるための角運動量輸送の原因として、超新星爆発起源の乱流が影響しているという理論モデルが有力視されるものの、その直接的な証拠を得ることはこれまでできていなかった。この問題に対して VLBI は、CND/Torus スケール (~ 1 -数 10 pc) を空間分解して星形成起源の放射を解像することができるほぼ唯一の方法で、独自性が極めて高い。今後、ALMA 望遠鏡によって CND/Torus 研究は革新的に進むと考えられ、VLBI が同時にユニークな情報を提供することで、シナジーが期待される。

なにをどこまでやるのか？

- **High- z クエーサー**：VLBI による high- z ($z > 3$) クエーサー検出数を現在の 10 倍以上 (数 100 天体) に増やし、VLBI で検出される赤方偏移も $z \sim 10$ を目指す (現在の VLBI レコードは $z = 6.3$)。近傍の電波銀河および遠方クエーサー電波源 ~ 10 天体のジェットおよび電波ローブを空間分解する。
- **CND-starburst connection**：近傍 (~ 100 Mpc 以内) で、ALMA 望遠鏡等による分子輝線観測で CND が検出されている天体 (~ 50 天体) を対象に低周波 (~ 1 GHz) 観測を行い、超新星爆発起源の電波連続波放射を可視化する。分子輝線と連続波放射のモロフォロジーの比較、分子輝線の速度分散と連続波強度の比較によって、角運動量輸送を担う乱流が超新星爆発に起因するものかを明らかにする。

新規性

低周波 (1-10 GHz) でマイクロ Jy の VLBI 観測をすることで、衝撃波・粒子加速現場の微細構造や遠方宇宙の pc スケール可視化を史上初めて実現。

日本の (VLBI 研究の) 独自性・優位性

我々 (VLBI コミュニティ) の経験

大口径センチ波電波望遠鏡群 (JVN) をマイテレスコープとした独自観測。センチ波スペース VLBI (VSOP) の実績。L-band 超電導フィルタ受信機の開発。

国内の天文関連コミュニティ (他波長・理論など) の経験

High- z クエーサー Subaru/可視光チームによる high- z クエーサーサーベイ (松岡ら)。
CND-starburst connection ALMA を使った CND/Torus 研究グループ (今西、泉ら) や、理論的研究 (川勝ら)。

ホットスポット空間分解 数値シミュレーションを用いた kpc-scale jet、ホットスポット、ジェット多層構造の理論的研究（町田、藤田、赤堀、當真ら）。PIC シミュレーションによる粒子加速の理論的研究（星野ら）。

先行研究

VSOP L/C バンドによる AGN ジェット伝搬領域・下流の観測（論文リスト参照）。大口径 JVN による高赤方偏移 ($z > 3$) クエーサー大規模サーベイ・カタログづくり（古谷、新沼ら）。

必要な性能について

本テーマはいずれも 1–10 GHz 帯という低周波が重要であり、 $1\mu\text{Jy}$ 程度のイメージング感度が必要である。必要な空間分解能はサブテーマによって異なり、high- z クエーサーの場合はパーセクスケールを撮像可能な 10 mas 以下程度、一方ホットスポットやジェットの微細構造を空間分解するには 1 mas 以下程度が必要である。

推進計画

短期：～2022 年 3 月

研究：JVN を用いた high- z クエーサー ($z > 3$) カタログのコンパイル。EAVN 6.7 GHz を用いて近傍 FR-II 天体ホットスポットの VLBI パイロット観測を開始し、EAVN+FAST に向けた候補天体をリストアップ。

開発・試験：FAST を含む EAVN L-band 試験に向けた準備。スペース VLBI については ISAS リサーチグループ発足。ミリ波衛星に SKA 帯アンテナを付加することを前提にミッション成立性の検討。

中期：第 4 期中期計画（～2027 年度）

研究：EAVN+FAST（及びグローバル VLBI）による high- z クエーサーやホットスポットの高感度 VLBI 観測。ジェット多層構造についてはジェットが最もよく空間分解できる近傍電波銀河 (M87, CenA, 3C84, CygA) について、EAVN+FAST で超高感度観測を展開する。

開発・試験：FAST を含む EAVN-low 及びグローバル VLBI の定常運用体制確立。スペース VLBI は ISAS WG を経てスペースミッション提案・プリプロジェクト化。

長期：2028 年度以降

SKA-VLBI, EAVN+FAST, スペース SKA を用いた観測研究へ展開。

参考文献

- [1] Ryo Mikami, Katsuaki Asano, Shuta J. Tanaka, Shota Kisaka, Mamoru Sekido, Kazuhiro Takefuji, Hiroshi Takeuchi, Hiroaki Misawa, Fuminori Tsuchiya, Hajime Kita, Yoshinori Yonekura, and Toshio Terasawa. Wide-band Spectra of Giant Radio Pulses from the Crab Pulsar. *ApJ*, 832(2):212, December 2016.
- [2] K. Takefuji, T. Terasawa, T. Kondo, R. Mikami, H. Takeuchi, H. Misawa, F. Tsuchiya, H. Kita, and M. Sekido. Very Long Baseline Interferometry Experiment on Giant Radio Pulses of Crab Pulsar toward Fast Radio Burst Detection. *PASP*, 128(966):084502, August 2016.
- [3] 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. , 208(1):11, September 2013.
- [4] 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*, 1:0146, July 2017.
- [5] 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. , 877(2):L25, June 2019.
- [6] 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. , 900(1):L2, September 2020.
- [7] Takashi Hosokawa and Kazuyuki Omukai. Evolution of Massive Protostars with High Accretion Rates. , 691(1):823–846, January 2009.
- [8] Takashi Hosokawa, Harold W. Yorke, and Kazuyuki Omukai. Evolution of Massive Protostars Via Disk Accretion. , 721(1):478–492, September 2010.
- [9] L. Haemmerlé, P. Eggenberger, G. Meynet, A. Maeder, and C. Charbonnel. Massive star formation by accretion. I. Disc accretion. , 585:A65, January 2016.
- [10] Masahiro N. Machida and Takashi Hosokawa. Failed and delayed protostellar outflows with high mass accretion rates. , October 2020.
- [11] S. Goedhart, M. J. Gaylard, and D. J. van der Walt. Periodic flares in the methanol maser source G9.62+0.20E. , 339(4):L33–L36, March 2003.
- [12] 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. , 68(5):74, October 2016.
- [13] 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*, volume 1380 of *Journal of Physics Conference Series*, page 012057, November 2019.
- [14] 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. , 769(2):L20, June 2013.
- [15] 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*, 8286:1, November 2015.
- [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*, 13(3):276–279, March 2017.
- [17] 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*, 4:506–510, January 2020.
- [18] 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. , 634(1):459–467, November 2005.
- [19] Tomoya Hirota, Masato Tsuboi, Kenta Fujisawa, Mareki Honma, Noriyuki Kawaguchi, Mi Kyoung Kim, Hideyuki Kobayashi, Hiroshi Imai, Toshihiro Omodaka, Katsunori M. Shibata, Tomomi Shimoikura, and Yoshinori Yonekura. Identification of Bursting Water Maser Features in Orion KL. , 739(2):L59, October 2011.
- [20] 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. , 66(6):106, December 2014.

- [21] 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. , 66(6):109, December 2014.
- [22] 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, 12446:1, January 2019.
- [23] 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. , 72(1):4, February 2020.
- [24] 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. , 686(2):1056–1081, October 2008.