

水沢 VLBI 観測所 SKA サイエンス WG 報告書

廣田朋也、秦和弘、本間希樹、坂井伸行(国立天文台)

元木業人、新沼浩太郎(山口大学)

2017年7月25日 ver. 1

アブストラクト

本報告書では、2015年4月に設立された水沢 VLBI 観測所 SKA サイエンス WG において議論された、水沢 VLBI 観測所の将来計画の1つとして挙げられている SKA での科学的研究の検討内容についてまとめた。

1 WG 設立の背景

現在水沢 VLBI 観測所では将来計画の策定が課題となっており、その中で SKA が可能性の一つとしてあげられている。2014年度には、水沢 VLBI 観測所では将来計画のための所内シンポジウムを3回開催され、第1回では現在進行中または計画中のプロジェクト全般(VERA, EAVN, global VLBI, ミリ波 VLBI, スペース・気球, ALMA, SKA)について、2回目以降は、特に SKA を選択肢の1つとして重点的に議論を進めた。現時点では、水沢 VLBI 観測所は将来計画として SKA が確定しているわけではないが、SKA1 が始まろうとしている現在、方向性について早急に決めることが求められている。また、これと並行して、日本における SKA の推進母体である SKA-JP から、SKA の実現に向けてサイエンス面、技術面、国立天文台におけるプロジェクト推進面にて協力の要請が来ている。

このような状況を踏まえ、観測所内に Mizusawa VLBI Observatory SKA Science WG (MIZ-SKA-SWG, MSS)を設置し、将来の方向性を打ち出す際の重要な判断材料となるよう科学面について具体的な検討を行った。

2 活動内容、獲得目標

本 WG では、コアメンバーを中心に、観測所員や関係者に開かれた形で定期的に会合を持ち、2017年6月時点で35回の会合で具体的な議論を行った。メンバーは、代表の廣田と所長の本間が、各専門分野から若手研究者を中心に声をかけて組織した。ただし、議論はオープンになっている。また、適宜 SKA-JP の主要な人物にも議論に参加していただき、情報交換を行った。

本 WG の目標は、科学的な観点、特にこれまでに進めてきた VLBI、銀河系天文学、恒星物理学、星形成、活動銀河核などの科学的研究をどのように発展させることができるか、という点を考慮して、水沢 VLBI 観測所の将来計画として SKA にどのような貢献ができるかを議論することにある。

例えば以下の観点が鍵と考えられる。

- ① 我々がこれまでやってきサイエンスを大きく発展させることができるか(銀河系アストロメトリ、レーザー、星形成、晩期型星、AGN など)
- ② 我々がこれまで培ってきた科学的手法(電波干渉計による高分解能イメージング、マルチビーム観測、位相補償などのキャリブレーション手法など)を活かして新たな科学研究を展開することができるか
- ③ その他、将来的な科学的動向を踏まえた上で、水沢 VLBI 観測所の大きなリソースを将来配置するのにふさわしいか

また、必要に応じて、現在検討中のその他の電波天文将来計画(Appendix 2)とも対比をさせながら検討を進めた。活動の詳細については、Appendix 3 にまとめた。

3 一般的な議論の観点

サイエンスの質的転換: SKA が目指すサイエンスでもインパクトが大きいものは、これまで水沢 VLBI 観測所や国内の VLBI グループが進めてきたサイエンスとは質的には大きく転換したものとなっている。一方で、これまでの研究と関連の深い分野については、多くが量的な向上に限定されている。SKA ではどのようなサイエンスを目指すか?という点で、まずはこのどちらが重要な目標となるかを個々のサイエンスごとに検討しなければならない。一方、例えばパルサーの研究では、サイエンスが質的転換をしても VLBI が重要な役割を果たし、そのために過去の経験が生かされる。このような、質的なサイエンスの転換があっても VLBI を用いた研究が可能なテーマは考えられる。より極端な議論として、逆説的に「SKA ではできないサイエンスは何か?」という観点も検討する余地がある。それがわかれば、準備や将来の研究テーマ、SKA に参加する上での優位性にもつながると考えられる。

VLBI による高空間分解能: これまでの VLBI での研究では、最も重要な仕様は他の手段では達成が不可能(あるいは極めて困難)な高い分解能ということができる。これは近年の赤外線干渉計や最高分解能の ALMA、GAIA などの位置天文観測衛星では達成可能であるものの、依然 VLBI の優位性の一つとして挙げられる。SKA1 では VLBI ほどの高空間分解能が達成できない。VLBI に比べて低い分解能でどのようなサイエンスが可能か、または、SKA1 の時代でもどのような研究が VLBI による高空間分解能というメリットを生かすことができるか、という観点が重要である。SKA1 とリモートアンテナを組み合わせた VLBI サイエンス、という観点も重要である。VLBI による高空間分解能は SKA2 時代でも使い方によっては十分な意義がある。

SKA による広視野サーベイ: SKA は高い感度が最も重要な仕様として研究が計画されているが、SKA1 に関しては JVLA と比べても圧倒的に高いというほどではなく、特に ng-VLA に対して優位性はない。一方で、SKA1 ですら広視野を活かしたサーベイ速度では他の装置に比べても圧倒的に有利である。感度よりは、むしろ広視野でのサーベイという観点で SKA1 のサイエンスを検討

する必要がある。例えば、トランジェントの観測では広視野が圧倒的に有利であり、このようなサイエンスの検討が SKA1 では重要となる。これまで VLBI で目指してきた高空間分解能という観点とは異なるパラメータスペースである、SKA によるサーベイ・広視野を組み合わせという観点で独自性を出す必要がある。

未発達の Time-Domain 研究: さらに異なる観点として、時間分解能の重要も指摘されている。時間分解能の高い観測では、即時にその現象に対応する天体同定のために高空間分解能のフォローアップが不可欠であり、機動力のある VLBI 網の構築に意義がある。これにより、SKA の弱点の1つ(高空間分解能、占有不可能と言う意味で時間分解能)を補うというアドバンテージを持って乗りこむことが可能になる。

南天への展開: SKA への参加を検討する上で、南天でのサイエンスの必然性、優位性についても検討が必要である。単純に北天では数が少ない、北天ではできない天体がある、という観点だけでなく、南天で行う必然性などより強い理由づけが求められる。

技術的な優位性: SKA による低周波数帯の観測では、電離層によるデータ較正が重要であるが、これは現在世界中で検討や試験が進められている。VLBI 研究でも、BESSEL、KaVA、JVN でのメタノールレーザー観測や OH レーザー観測に関連した研究が進められている。新たなデータ較正の確立により、位置天文の高精度化や新しいサイエンスが実現できると期待される。このような観測技術の経験を生かして SKA に乗りこむということも重要なステップである。これらの検証では、達成可能な精度や他の装置や手法に対する優位性などを定量的に議論しなければならない。

4 サイエンス検討結果

本報告書を作成するにあたっては、特に現在の水沢 VLBI 観測所での研究に近い分野のトピックスについて、主に、2014 年 Proceedings of Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14) を中心に文献をレビューし、サイエンスの方向性を検討した。水沢 VLBI 観測所でのサイエンスには直接的な関係が弱い分野については取り上げていないため、SKA サイエンスブックに掲載されている全てのテーマについて網羅的に検証するというはしていない。以下で取り上げられていない課題も将来計画として検討するのであれば、他波長観測や理論の専門家も含めた新たな共同研究の枠組みを確立することが必須である。一方で、文献には発表されていないような独自の研究テーマがあれば本報告書にも含めてある。個々の分野の検討結果は Appendix にまとめる。また、主要な情報については表 4.1 にまとめる。

4.1 これまでの研究からの継続的な発展

銀河系アストロメトリ: VERA による研究ではレーザーを用いた銀河系位置天文観測が主要なサイエンステーマとして研究が進められてきた。SKA 時代でも銀河系構造研究を主導するのは、SKA も含む VLBI アレイや Gaia、JASMINE であると考えられる(Appendix 1.3)。VLBI 位置天文研究では南天における観測網が十分でないこと、可視光帯の Gaia 衛星は銀河面の

観測が不得手なことから、SKA では現在未開拓の南半球での銀河系位置天文観測を大きく発展させることが可能である。SKA により位置天文観測精度が既存の装置より 2 倍(5 マイクロ秒角)高くなれば、銀河系中心以遠の位置天文研究が可能になり、本当の意味での銀河系構造の全容が解明できる。SKA では、メーザーだけでなく、微弱な連続波天体も観測対象になり、観測天体が飛躍的に増加することが見込まれる。また、現在 VERA で行なわれている 6.7 GHz 帯のメタノールメーザーによる位相補償観測やデータ解析の経験や、キャリブレーション手法が確立すれば、これらが SKA の位置天文観測で優位性を発揮できると期待される。また、VERA の広帯域化で可能になる微弱なキャリブレータを用いたインビーム位相補償が検証できれば、これも SKA での位置天文観測でキーとなる較正手法として貢献が可能となる。これらは、SKA による位置天文観測を推進するために必要な準備研究として必須のテーマとなる。

活動銀河核(AGN): VLBI 観測のもう1つの柱である AGN 研究(Appendix 1.4)では、これまで高空間分解能による巨大ブラックホール(BH)近傍の高輝度・高エネルギー現象が主要ターゲットであり、相対論的ジェット生成・加速・収束領域、磁力線構造の探査が活発に行なわれてきた。近年はミリ波でのジェット駆動領域や BH 周辺構造が観測可能になり、また、X 線/ガンマ線望遠鏡との合同観測も大きな潮流の1つとなっている。SKA では、高い感度とダイナミックレンジ、解像度を生かしてこれらのサイエンスを直接発展させ、より多くの天体に対し、駆動領域から終端領域に至るジェット構造・磁力線構造のイメージングが可能になる。また、高いダイナミックレンジにより、円盤からの wind 成分のような更に外側の低輝度成分が多くの天体で発見される可能性もある。感度の向上により、電波で暗い AGN 種族や high- z AGN の観測天体数も増え、AGN の統一モデルや宇宙論的進化についても統計的研究が大きく進展すると期待される。これらの準備研究には、SKA のパスファインダーとして EAVN(FAST も含む)が最も有力な候補の1つであり、現在手薄な低周波受信の整備を進めることが必要となる。長期的には、これまで日本が培ってきた独自性として低周波数でのスペース VLBI を検討する価値がある。

4.2 異なる研究分野への新展開

星惑星系、星間物質: VERA では、位置天文観測で用いられるメーザーにより星形成や晩期型星の研究も広く行われている。SKA による高い感度やサーベイ能力を生かして現在の研究をそのまま発展させることが可能なのは自明であるが、どのような新しいサイエンスが科学的に重要なのかは、引き続き検証が必要である。本報告書での議論では、メーザーによるサイエンスはほとんど検証されていないため、ここでは省略する。一方で、SKA によって可能になる微弱な連続波観測では、形成直後から進化最終期、惑星質量から大質量までの多様な連続波電波源の観測が可能になる(Appendix 1.1)。これにより、星形成・恒星進化や位置天文への応用など、幅広いサイエンスが期待される。また、星間物質の観測により、銀河系構造や系外銀河へのサイエンスの発展も考えられる。さらに、系外惑星探査や星間物質研究など、宇宙生物学に関連する分野への発展も期待される。また、メーザー観測と連携した原始星の直接撮像観測(Appendix

1.2)のようなオリジナルの全く新しい研究テーマも検討されている。これまでもメーザーで観測可能だった種族の天体については直接的な研究の発展となるが、それ以外の天体については新しい分野となる。恒星物理、星間物質、惑星科学など他分野との共同研究が必須である。JVN の高感度化や EAVN の発展により、VLBI による微弱連続波源の試験観測などで準備を進めることが重要である。

トランジェント、FRB: 広視野で全天球面を監視するような観測が実現すれば、未知天体からの電磁波放射が高い確率で偶発的に検出され、新たな天文学分野が創造される可能性が飛躍的に高くなる。電波領域でも、広視野撮像の技術が発展することにより多様な変動天体（トランジェント、Appendix 1.5）が発見され、近年は FRB(Fast Radio Burst)のような現象も天文学におけるホットな話題として注目されている(Appendix 1.6)。これまでに発見されている多様な突発電波天体の起源・放射機構を理解するためには、他波長との連携による共同観測体制の構築がもちろんのこと、非常に広い視野を監視しつつ、視野内の電波天体を高い角度分解能で観測することのできる SKA が必須である。VLBI によるこれまでの経験は、発生位置特定に必須な位置測定精度・技術、構造の変化を追うことのできる角度分解能、Snapshot による短時間イメージングなどで生かすことが可能である。また、FRB による Dispersion Measure の測定によりプラズマの柱密度を決定し、バリオンの計測や宇宙論パラメータの決定など、新たな研究分野への発展も期待される。SKA と組み合わせた高感度 VLBI により FRB の位置決定ができれば、その起源に大きな制限を与えることが可能になる。SKA 時代までに、このような VLBI による準備研究を Commensal な形でも進めることが重要である。その際、広帯域記録などの技術で優位性を発揮することが期待される。

パルサー: パルサー観測は SKA でのキーサイエンスの1つとして最重要課題である(Appendix 1.7)。VLBI に直接関連する研究として、パルサータイミングや位置天文観測が具体的に挙げられているが、これまでの水沢 VLBI 観測所をはじめとした日本国内の VLBI コミュニティでは低周波数での観測経験が不足している。パルサー研究分野をリードしていくためには科学的な検討や準備研究に加えて、新たな観測手段の整備も早急に始めることが必須と考えられる。低周波数帯での VLBI 観測や、パルサー検出に特化したバックエンドシステムや相関器技術などが期待される。また、サイエンスについても、パルサー研究の専門家も交えたより詳しい検証が必要である。

SETI: SKA の特筆すべき特徴の1つとしては、SETI(Search for Extraterrestrial Intelligence)が科学的なテーマとして取り上げられているということも挙げられる。自然界の放射と区別して通信信号を検出するには、高空間分解能での VLBI 観測も有利性があると思われる。一方、このような研究が、本当に科学的と言えるのか、水沢 VLBI 観測所の科学研究の柱として推進できるのかどうかは大きな議論となるであろう。もし SETI を将来の科学研究として進めるのであれば、新たな枠組みで行うことも考えなければならない。また、研究コミュニティや社会からの理解も不可欠であろう。

5 まとめ

上記の検討から、SKA 時代にこれまでの水沢 VLBI 観測所の研究を発展させることができる分野としては、銀河系アストロメトリや AGN、レーザーによる恒星や原始星観測などがあげられる。これらは我々の研究実績や位相補償観測などの観測技術と SKA の超高感度が組み合わさることで、主に天体数や感度面で大きな研究進展が期待される（量的新規性）。一方、VLBI の技術を活かしつつ新たな方向性を開拓できる分野としては、パルサー位置天文観測、トランジェントなどの時間領域観測があり、さらに新たな展開が惑星電波観測や SETI といった分野で期待される（質的新規性）。これらの分野の位置づけを、量的新規性—質的新規性という軸で図示したものが図 4.1 である。この図中で色は、SKA の 6 大テーマとの対応関係を示してある。仮に最も質的新規性（と同時にリスク）の高い SETI および惑星観測を除いたとしても、これまでの VLBI の実績を活かして、SKA の主要 6 テーマの中でも複数に貢献していくことが十分可能であると考えられる。その意味からも、SKA 計画は水沢 VLBI 観測所の将来計画として十分なポテンシャルを持っており、その実現性について VLBI コミュニティと連携しつつより詳細な検討をしていくのが望ましい。

一方、今回の検討でも SKA の主要サイエンスのうち宇宙再電離や銀河磁場などについては VLBI との関連の観点から検討の対象とならなかった。これらのテーマについては VLBI の延長として見たときに少なからずギャップがあることも事実である。このギャップを補完してより SKA のより強力な研究推進体制を構築するためには、SKA-JP 等従来の VLBI とは異なるコミュニティと協力していくことも必須である。また、パルサーやトランジェントなどについても国内 VLBI 分野での研究例が少ないため、他分野研究者とも連携してサイエンスに関して経験を積んでいくことが必要である。

表 4.1: 主なサイエンステーマ早見表

以下の表では、本レポートで検討された各サイエンス提案に対して重要な観点を簡単にまとめた。また、SKA Science Working Group (SWG) として定義されているサイエンステーマ（5 大テーマより細分化）で該当しうるものを取り上げた。全てのテーマで、Focus Group (FG) VLBI の内容には該当する。一方、SWG のうち、宇宙再電離、系外輝線、HI 銀河進化に対応するテーマは今回挙げられていない。

該当する SKA サイエンス WG のテーマ	キーワード	新規性	独自性 優位性	重要な スペック	準備研究
宇宙再電離					
HI 銀河進化					

宇宙生命 (天の川銀河) (太陽圏)	大質量原始星の直接撮像と大質量星形成機構の解明	質的	時間変動メーザーの研究	分解能*	メーザー、理論
宇宙生命 (天の川銀河) 太陽圏	惑星電波源探査、これを用いた惑星系研究や位置天文	質的	水沢の惑星探査グループとの共同研究	感度	広帯域 VLBI
宇宙生命 天の川銀河 太陽圏	恒星電波源探査、これを用いた恒星物理学や位置天文	量的	JVN,EAVN	感度	広帯域 VLBI
ダークマター・ ダークエネルギー 宇宙生命 (宇宙磁場) 天の川銀河	メーザー、連続波による位置天文	量的	VERA	南天、 較正	VERA、南天
系外連続波 宇宙磁場	AFN ジェット (pc から kpc/Mpc)、 Radio quiet AGN	量的	KaVA/EAVN	uv カバレッジ、 感度、 分解能*	KaVA/EAVN
系外連続波 (宇宙磁場) 突発天体	トランジェント	量的	位置天文	視野	Commensal な観測モード の実証
系外連続波 (宇宙磁場) 突発天体	FRB	量的	位置天文	視野	ToO 観測モードの実証
宇宙磁場 天の川銀河 パルサー	パルサー位置天文	量的	位置天文、キャリブレーション	感度	キャリブレーション、銀河系構造、磁場
宇宙生命 (天の川銀河)	SETI	質的	位置天文?	視野、 感度	社会への理解の増進?

注: SKA2 が必要な場合は重要なスペックへ*を示す

注: VLBI の必然性はほぼ全て共通

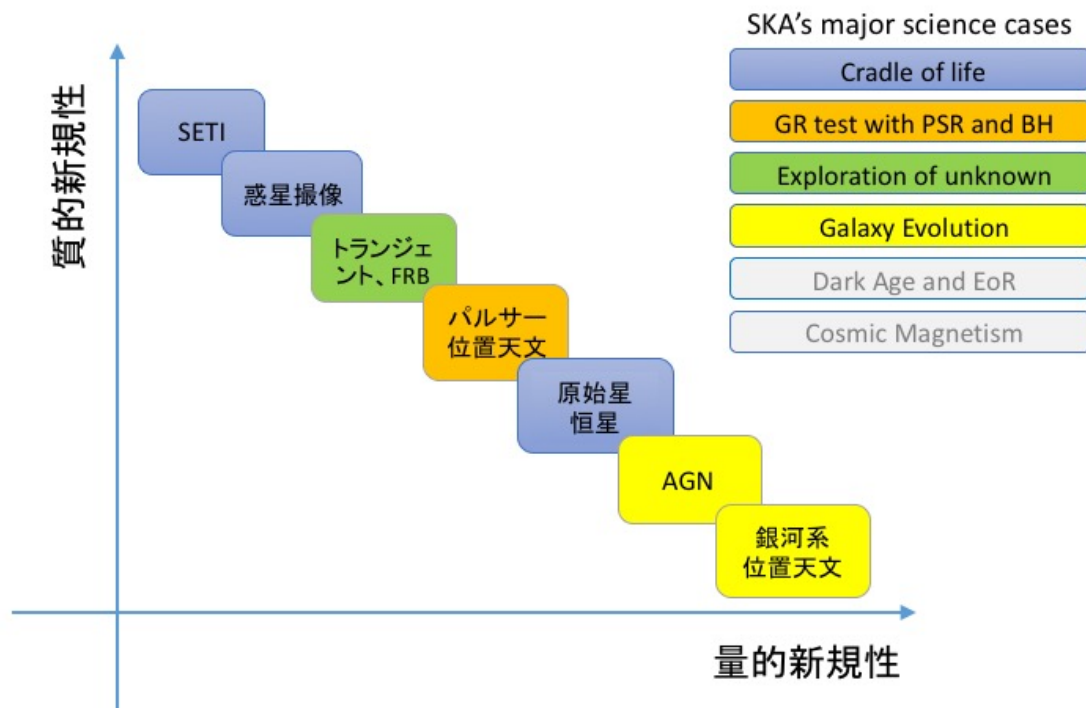


図 4.1 : VLBI 関連の主要な研究テーマ

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、熊本大学の高橋慶太郎氏、鹿児島大学の今井裕氏には多くの会議でそれぞれ SKA でのパルサーや位置天文・VLBI に関する情報を提供していただきましたことを感謝いたします。

Appendix 1. 各分野の検討内容

1.1 星間物質・恒星・惑星(廣田朋也)

1.1.1 背景(これまでの研究とその問題点や限界)

VLBI による星惑星形成の研究では、これではほとんどがメーザー源を対象としており、星形成領域の進化段階やアウトフローやジェットの駆動機構、ショック領域の力学、星周ガス円盤を通した質量降着の研究などが行われている。また、位置天文観測による星形成領域の3次元構造の研究もなされている。メーザー以外では、恒星フレアの非熱的連続波源を用いた位置天文観測や星形成領域の3次元構造の研究がメーザー源と相補的な役割を果たしている。また、X線観測と合わせた磁気圏活動の研究、連星系軌道運動の精密計測など、前主系列星の物理的性質の議論なども行われている。しかし、これまでのVLBI観測では、大質量星形成領域のメーザー放射以外は強度が十分ではなく、観測天体数は限りがある。

SKA では、微弱な電波連続波の位置天文観測が高感度化によってより多くの天体で可能になる。星惑星形成の研究分野(Hoare et al. 2014)では、連続波源を用いた位置天文観測(Loinard et al. 2014)により、SKA1 での近傍分子雲の3次元構造の研究、SKA2 での kpc スケールの銀河腕の研究へと発展することが期待されている。電波連続波は星間塵の影響を受けないため、GAIA と相補的な役割を果たすと同時に、共通天体でのシナジーも期待される。連続波源はメーザーより多くの様々な天体で検出可能であり、メーザーやパルサーとも相補的に連携することが可能である。研究対象は恒星(Umana et al. 2014)、惑星磁気圏(Zarka et al. 2014)も提案されており、恒星物理学、惑星科学という新しい観点からの議論が必要である。

さらに、星間分子や生命関連分子(Thompson et al. 2014, Codella et al. 2014)、星間塵起源の "Anomalous Microwave Emission; AME"(Dickinson et al. 2014)、原始惑星系円盤(Testi et al. 2014)、星形成星団の Deep Field(Hoare et al. 2014)、 H_2CO 吸収線による銀河系構造研究(Thompson et al. 2014)、SKA サイエンスブックでは議論がなされていない系外電波源に対する吸収線観測などのサイエンスもある。直接的とは言えないが、VERA を含む星惑星形成研究や銀河系研究の発展、電波天文学の将来計画という観点からは検討の余地はある。SKA でのこれらのサイエンスでは高感度での多数の天体、多様な天体の研究に主眼がおかれており、高空間分解能というVLBIの特徴を生かしたサイエンスが独自性を発揮する上で重要になると考えられる。

これまでのVLBIで行われていたメーザーによる星形成・恒星進化の研究について、本WGでは議論はしていないが、OH、 CH_3OH (6.7 GHz)などをツールとしたより弱い多くのサンプルでの研究が期待される。高精度な偏波観測による磁場構造の解明は銀河系研究や星形成研究にインパクトを与える可能性もある。メーザーサイエンスについては、高感度なSKAによって、これまで系内天体でしか行われていない位置天文観測(銀河系・アストロメトリの章参照)、サンプルが限定される系外メガメーザー(AGNの章参照)の観測も可能になると期待される。ただし、これら場合は、SKA1+既存のリモート局、SKA2のように、既存のVLBIをしのぐ高い分解能が必須である。

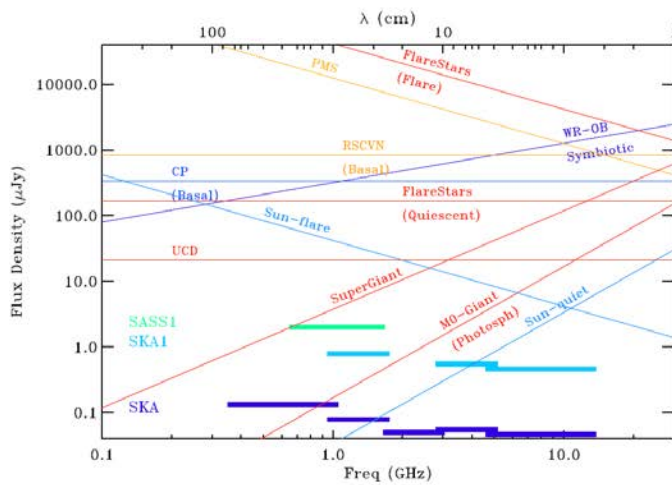


図 1.1.1. SKA で観測可能な星からの連続波スペクトル。典型的な距離を仮定。Umana et al. (2014)より。

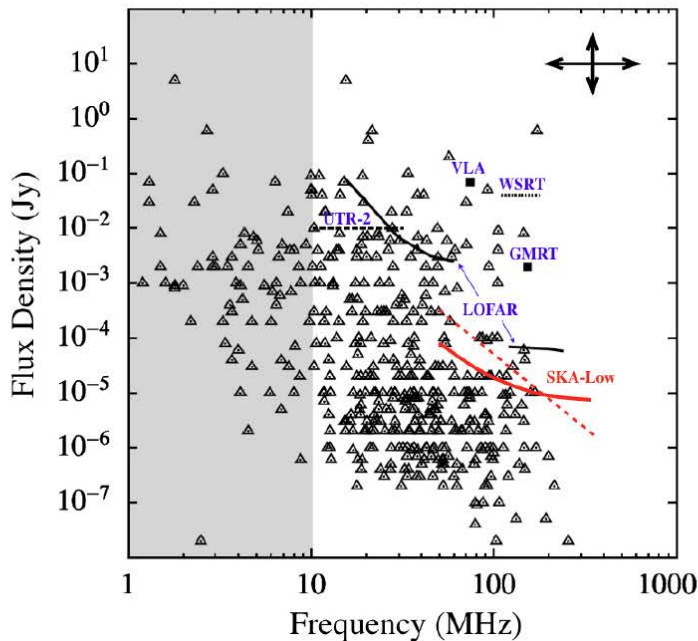


図 1.1.2. 2011 年時点で既知の系外惑星からの予想される連続波フラックスとピーク周波数。Zarka et al. (2014)より。

1.1.2 SKA で目指すサイエンス

- 概要、意義

形成直後から進化最終期、惑星質量から大質量までの多様な恒星連続波電波源の観測的研究、微弱なメーザー源を用いた星形成・恒星進化・系外銀河研究、これらを用いた位置天文観測。さまざまな天文学・宇宙物理学分野への波及効果がある、幅広いサイエンスが期待される。また、系外惑星探査やその多様性の研究では、宇宙生物学に関連する分野への発展も期待される。また、全てこれまでの水沢 VLBI 観測所、あるいは国内 VLBI グループが進めてきた研究の直接的な発展となっている。

- **何が新しいか？**

- **これまでの世界での研究、あるいは VLBI、水沢での研究との比較**

ここで検討されている研究は、主にこれまで VLBI で進められてきた科学的テーマの延長として位置づけられる。SKA での研究は、圧倒的に高い感度によって天体数を増加できることにある。一方で、空間分解能は、周波数が低いこともあり、既存の VLBI や ALMA による研究を上回ることはない。

- **どう質的転換？**

SKA の高い感度により、微弱な天体の観測が可能になる。これにより、惑星系のような既存の装置での検出が不可能な天体が研究対象となれば、全く新しいサイエンスへと発展が期待される。惑星系の電波は今後の惑星形成やその多様性の解明に向けて重要なサイエンスになる可能性がある。

- **どう量的転換(定量的に)？**

SKA によって感度が上がることで観測可能な天体数(キャリブレーション)が増加する。定量的に観測天体数を見積もるには、今後の準備的なサーベイによる光度関数の議論が必要である。一方で、分解能は最大でも 1 mas(最高周波数、最長基線)であり、高い信号雑音比による高精度位置天文観測はキャリブレーション精度に大きく依存する。

1.1.3 日本、水沢、VLBI などの独自性・優位性

- **我々の現在の研究がどう発展できるか？**

ここで紹介した研究は、多くがこれまでの VERA や JVN、KaVA で行われてきたテーマの発展である。

- **我々の過去の経験や蓄積(位置天文やデータ較正、電波干渉計、VLBI など)がどう生かされるか？**

位置天文観測の精度検証やデータ較正方法、データ解析の技術はほぼそのまま SKA でのサイエンスにも生かされる。SKA で検討しなければならない点は、低周波数帯での電離層補正であるが、これは現在メタノールレーザーや OH レーザーの位置天文観測の検証という観点で国内のグループでも進行中である。

- **我々の先行研究や独自性は？**

VERA によるレーザー観測、JVN を用いた微弱な系内連続波源の観測試験、時間分解能をキーワードにした JVN でのモニター観測は、SKA でも同様の研究を発展するという点、観測時間獲得が困難な SKA に対して独自にフォローアップが可能という点、さらに SKA と組み合わせた VLBI を構成することでミリ秒角を切る高精度位置天文観測を可能にするという点で独自性が発揮される。既存の VLBI ネットワークで行われている研究は、FAST など大口径低周波数アンテナと組み合わせた高感度な EAVN を実現させることで、より直接的に SKA へと発

展させることが可能である。

1.1.4 必要なスペック

- **何が最も重要な特徴か？**

- **感度**

対象天体を増やすためには性能向上は不可欠。輝度温度 1000 K で 1 mas の天体は波長 1cm でフラックス密度 0.7 μ Jy に相当する（波長の 2 乗に反比例し、天体サイズの 2 乗に比例）。観測天体のサイズ（距離）と温度によって感度を見積もることが必要。

- **空間分解能**

SKA の分解能自体は低く、特に SKA1 では 1 mas レベルの分解能を達成するには既存のアンテナを組み合わせた VLBI が必須。系外銀河の研究を目指すのであれば、既存の VLBI をしのぐ分解能が本質的に重要。

- **視野**

広視野で複数天体の効率的な同時観測やサーベイでは必須であるが、ターゲットが既知の（これまでの VLBI 観測のような）モードでは重要ではない。X 線天体(MAXI など)との共同観測の場合は、広視野での素早い同定が重要。

- **時間分解能**

変動天体に特化する場合は時間分解能の検討が必要となるが、現時点では議論材料はない。X 線天体(MAXI など)との共同観測の場合は、素早い（数時間から最低でも 1 日以内）フォローアップが重要。位置天文や変動調査のための長期間モニターは必須。

- **周波数帯**

メーザー観測を行うならば、L バンド(OH)、C バンド(CH₃OH)は必須。K バンドまで延ばすことができれば H₂O もカバー可能。

- **SKA1 で可能か？SKA2 を待たなければならないか？**

SKA での VLBI モードが実現されれば、SKA1 でも可能であるが、SKA 単体で 10 mas レベルの分解能を実現するには SKA2 の最長基線を待たなければならない。

1.1.5 SKA の必然性

- **他の装置での可能性？**

- **ALMA、既存の南天の望遠鏡**

位置天文観測は現状の ALMA では不可能であり、SKA の VLBI モードは必須である。近い将来に ALMA、またはその拡張版で高精度位置天文観測が可能になれば、SED の測定などシナジーも生まれる。本研究では南天の観測

に特化する必然性はないため、南天の望遠鏡という優位性はない。

➤ **VLBI(センチ波からサブミリ波)**

既存の VLBI では位置天文観測の精度は十分達成可能であり、準備研究も実行できる。ただし、感度が低いため、現状では観測可能天体は極めて少なく、準備研究にとどまる。

➤ **ng-VLA**

感度、分解能とも、目指すサイエンスを行うには十分と考えられ、SKA とは観測周波数帯の違いで優劣をつける、あるいは共存することを検討しなければならない。

1.1.6 準備研究案

● **既存の装置での準備研究の可能性**

➤ **VERA/KaVA/JVN/EAVN、SKA precursors または SKA1(SKA2 から参入ならば)**

位置天文観測の精度は十分達成可能であり、十分明るい一部天体での準備研究は可能である。

➤ **ALMA、既存の南天の望遠鏡**

高周波数、南天での観測という必然性はないため、必ずしも将来計画への準備には直結しない。

➤ **理論、他波長、その他**

これまで経験のない恒星物理学、惑星科学など、他分野の観測・理論研究とも共同研究は不可欠である。

1.1.7 将来計画への展望

● **SKA に参加をするならばどのような資源の整備が必要か？**

高帯域、低周波数の VLBI 観測が実現されれば、SKA でのサイエンスに直結した準備研究が可能である。また、これまで経験のない恒星物理学、惑星科学など、他分野の観測・理論研究とも共同研究が不可欠である。

● **SKA に参加をするならばどのようなテーマの研究を始めるべきか？**

現在の水沢 VLBI 観測所でのサイエンスに直結するものであれば、星形成領域や晩期型星のアstrometry から始め、その後他分野との共同研究からサイエンスを発展させていく必要がある。

参考文献

- Codella et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 123
Dickinson et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 124
Hoare et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 115

Loinard et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 166
Testi et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 117
Thompson et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 126
Umana et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 118
Zarka et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 120

1.2 星形成（元木業人）

1.2.1 背景(これまでの研究とその問題点や限界)

2030 年代において想定される大型観測装置の最高空間分解能は ALMA 最長基線/SKA phase2/TMT (AO による回折限界@NIR)などいずれも数 mas - 10 mas のオーダーであり、半径 100 - 1000 AU 程度の降着円盤/エンベロープの性質を詳細に観測することが可能である。しかしながら、一方でこれは遠方の星形成領域(> 1 kpc)はもちろん、近傍星形成領域においても通常の原始星本体を空間分解するには遠く及ばない。また角運動量輸送や磁束問題など星形成の重要問題に関わる各種 MHD 現象(磁気制動、質量放出、オーム散逸、etc)の発生する領域も半径数 AU 以下の降着円盤内奥領域であり (e.g., Machida et al. 2008)、多くの場合直接的な空間分解は極めて難しい。すなわち ALMA/SKA 時代において降着円盤の物理的性質は理解できても、降着現象の本質を解き明かすには至らない可能性があるといえる。

原始星近傍における熱放射は総じて光学的に厚いことが予想される。ALMA においては主質量降着期を過ぎた原始惑星円盤ですらダスト放射が光学的に厚くなりうることが明らかになっており (ALMA Partnership et al. 2015)、活発な降着を伴う円盤において到達できる半径には自ずと限界があると予想される(特に edge-on の場合)。また SKA においては電離ガスの制動放射が同様に前景や自己遮蔽体として機能する可能性が懸念される。これは ZAMS 到達後の HMYSO や広がった HII 領域を伴う大質量星団内の YSO を研究する上で特に問題となるだろう。特に SKA の主力である低周波では極めて深刻な影響が予想されるため、高周波側での観測が主力となる可能性は高い。

現在一般に行われている VLBI による原始星観測のほとんどは各種メーザーを通じたアウトフロー/降着円盤などの 3 次元運動観測である。しかしながら散在するメーザー源の輝度ピーク位置の変移を追うという測定手法から、バルクな運動の推定精度は限定的である。また観測される星周構造は一声 100 - 1000 AU 程度であり、既に ALMA/SKA で直接的に手が届くスケールとなってしまった点も重要な観点である。適用する 3 次元運動モデルの不定性などを考慮した場合 ALMA/SKA による熱的輝線放射から得られる視線速度の 2 次元情報に、何らかの方法で見込み角を仮定して推定される 3 次元運動に対して、VLBI による直接測定が明確なアドバンテージを今後も保持出来るかは疑問が残る。逆に言えば VLBI 観測からは見込み角を主に測定し、ALMA/SKA の観測を組み合わせる方がより効率が良いという時代になりつつあるだろう。一方そうした大型装置の共同利用時間獲得のための予備研究としては、VLBI によるメーザー観測は安価であり、ある程度観測天体を選ぶ(十分なメーザー源が付随する)ため、統計的な研究がしづらという点を除けば非常に有用であると言える。KaVA における星形成 WG もこうした観点を考慮して観測を進めることが望ましいだろう。

○ 現在検討されている SKA によるサイエンスの例

1. Radio jets in Young Stellar Objects with the SKA (AASKA14 121)

SKAによる電波ジェット/連続波/RRL観測について検討している。高感度高品質なイメージング観測からジェット/アウトフローの加速収束機構を解明することを目指しており、電波ノットのモニターによる固有運動測定も想定している。また希に見られるシンクロトロン成分に体する偏波観測から磁場の測定も行う。予想される天体強度は多くの場合1 mJy以下であり、感度が求められる。SKAでは数kpc以内の天体に対して統計的研究が可能である。RRLに関しては輝線強度が非常に微弱なため(SKA phase1では100 km/s分解能 6σ /1時間)、複数のRRLをスタッキングして解析を行う必要がある。ジェットの時間変動からEpisodic accretionの時間スケールなど駆動領域の物理を引き出せるのであれば大きな意義がある。この点は理論的研究者も交えた真面目な議論が必須であるが、SKAによって十分な天体数が稼げるのであれば取り組む価値も十分あるだろう。

2. Star and Stellar Cluster Formation: ALMA-SKA Synergies (AASKA14 152)

電波-赤外におけるYSO変光の研究を提案している。SKAを用いて全質量範囲に対して数100天体の光度曲線の取得を目指す。YSOの磁気圏や回転、アウトフローの時間変動やepisodic accretionなどへの理解が進むと期待される。主要3周波数(1.6/7/14 GHz)でSEDの取得とモニターを行い放射機構の切り分けや(HII領域/熱的ジェット/シンクロトロン放射)、光学的厚みや電離環境の変化などを行う。またFull Stokesの観測により磁場情報の取得も目指す。想定感度は $1\mu\text{Jy}/\text{rms}$ であり、5kpc内の各星形成領域で数100天体の検出を予想している。空間分解能は0.1秒であり、星団内のHCHII領域を分離可能である。また長期モニターデータのスタッキングによって微弱天体(e.g., 中質量星周囲のHII領域)の検出なども想定。本検討が想定している3バンドはメタノール/OHなどの各種周期変動メーザーも同時モニターを想定しており、現在我々が進めている周期変動メタノールメーザーモニターに中心星の光度変動を加えた発展系とも言うべき仕事が可能である。

1.2.2 SKAで目指すサイエンス

● 概要、意義

タイトル: SKAによる膨張期の(大質量)原始星大気の直接分解観測

概要: 主質量降着期末期の膨らんだ(大質量)原始星(e.g., Hosokawa & Omukai 2009)に対してSKA phase 2を用いた電波光球の空間分解撮像を行い、星の構造を直接明らかにする。ベテルギウスの電波観測から知られているように(Lim et al. 1998, 図1.2.1参照)、膨張した低温度星の電波光球は可視光帯での光球に比べて1桁近く大きく、SKAの最長基線(3000 km)で5 - 20 GHzの周波数であれば直接的な空間分解の可能性はある。

● 何が新しいか?

➤ これまでの世界での研究、あるいはVLBI、水沢での研究との比較

- 想定されている周波数/分解能としては現行VLBIと同程度
- 一方で熱放射の観測(H-free-free)である点が全く異なる。

➤ どう質的転換?

- これまでに原始星を直接空間分解撮像した例は存在しない
 - パラメータ過剰な SED 等を経由せず原始星の温度やサイズなどの物理量を直接測定できる
 - 力学的な手法などから質量を決めるか、あるいは円盤やアウトフローの観測から降着率を測定できれば原始星進化が一意に決定出来る。
- **どう量的転換(定量的に)?**
- Hosokwa & Omukai (2009)によれば膨張期の時間は非常に短く、大質量原始星寿命(= 降着期の継続時間)の 1 – 10 %程度である(→10 - 100 天体に 1つ程度)
 - 同膨張期は Inayoshi et al. (2013)によれば原始星脈動の起こる時期であり、周期変動メタノールメーザー源の数比率 1 – 10 パーセントとも consistent に見える(=数十天体は見つかる可能性がある)。
 - SKA の広視野を利用して多数の若い星団形成領域(具体的には赤外線暗黒星雲中の大質量クランプ)を丸ごと観測しない限り統計的な研究は難しいが、重要度を考えれば 0 が 1 になる時点でも意義は大きい。

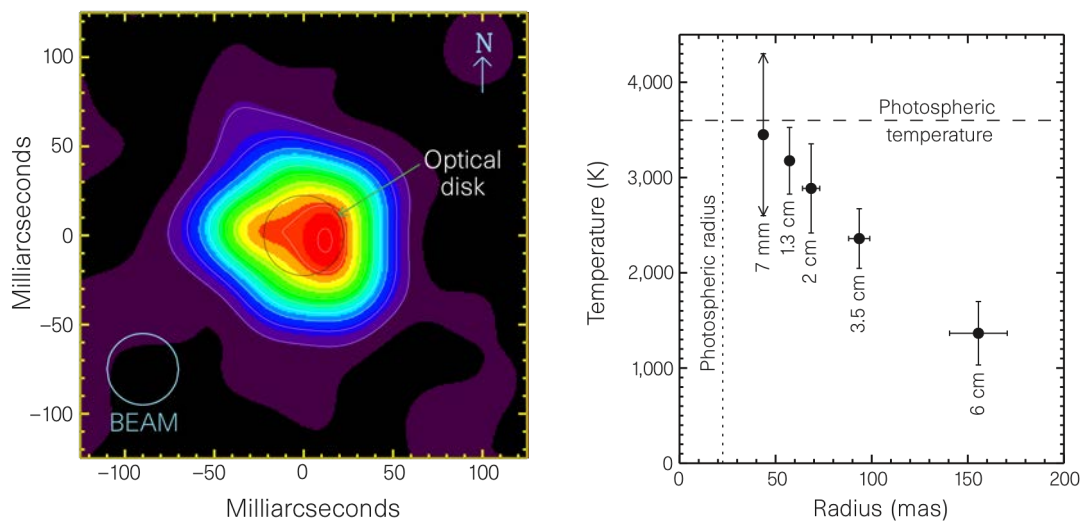


図 1.2.1: (左) VLA によって得られた 7-mm 帯でのベテルギウスの電波画像(Lim et al. 1998)。図中の黒線が可視光帯での光球を表しており、電波で見える光球が大きく広がっていることがわかる。(右)電波帯におけるベテルギウスの半径(横軸)と輝度温度(縦軸)の関係。低周波ほど外側の低温領域で光学的に厚くなっているため多周波観測から内部の温度構造を直接知ることができる。

1.2.3 日本、水沢、VLBIなどの独自性・優位性

- **我々の現在の研究がどう発展できるか？**

直接的な発展とは言い難いものの、科学的には星周構造の観測と星本体の観測は相補的である。包括的な高分解能原始星進化過程の研究という意味ではSKA/ALMA/VLBIの組み合わせは必然であろう。

- **我々の過去の経験や蓄積(位置天文やデータ較正、電波干渉計、VLBIなど)がどう生かされるか？**

前述のように観測スペックは現行のJVN/VERAによるVLBIと同程度であり、観測やデータ解析のノウハウはそのまま活かせる可能性が高い。SKA全体をみても高いダイナミックレンジを要求するサイエンスケースが多いため、self-calibrationなどの解析手法が重要になるケースは考えられる。

- **我々の先行研究や独自性は？**

残念ながらVLBI観測との直接的な接点は現状では無い。しかし単一鏡ベースで進めている周期変動メタノールレーザー探査/モニターの結果を生かした探査を行うことで、効率良く膨らんだ原始星を探索出来る可能性は大きい。

1.2.4 必要なスペック

- **何が最も重要な特徴か？**

- **感度**

輝度温度とサイズ(いずれも周波数依存)から予想される感度は $1 \cdot 5 \mu \text{Jy}$ 程度であり、phase2であれば常識的な積分時間で検出が可能である(表 1.2.1 参照)。

- **空間分解能:**

ベルギウスの例を考慮すると予想される電波高級の視直径は1kpcで10mas程度(低周波ほどサイズ大)。基本的にはmasオーダーの分解能が必要であるため、SKA phase 2で予定されている最長3000km基線は必須。また仮に星本体の解像が不十分でも、星へと接続する高温の降着流については解像できる可能性があるだろう。

- **視野**

探査の方針にも大きく依存する。既知または事前研究で検出した周期変動メタノールレーザー天体や光度変動YSOをターゲットにするならばほど広い視野は不要である。星団形成クランプに対して無バイアス探査を行うのであれば、1kpcのクランプ一個あたり(1pc)¹で3分角の視野でカバーできる。

- **時間分解能**

レーザーの変動周期から数10 - 数100日程度の脈動を起している可能性があり、そのモニターも面白い研究テーマといえる。

➤ **周波数帯**

予想される SED は右肩上がりであるため、分解能と感度の都合上 C バンド以上がのぞましく、可能であれば K バンドまで拡張したい。

● **SKA1 で可能か？SKA2 を待たなければならないか？**

基本的には原始星を分解するために必要な空間分解能の観点から、また感度の面から言っても Beam dilution の影響を最小限にする必要があることから、SKA2 が必須である。ただし星表面に接続する降着流が十分に高温で広がっている場合、SKA1 で点源として検出できる可能性もある。

表 1.2.1: 周波数ごとに予想される視直径とフラックス

周波数 (GHz)	有効温度 (K)	視直径 (AU)	Flux (μ Jy)
20	3200	2.5	4.5
15	2800	3.0	3.2
10	2500	3.8	2.0
6	1500	6.4	1.2

*可視光球サイズを 100 太陽半径、距離 1 kpc と仮定

1.2.5 SKA の必然性

● **他の装置での可能性？**

- ALMA : 光球サイズが小さくなるため同じ研究は不可、ただし降着率の導出など補完的な観測には必須である。また Extended-ALMA であれば直接空間分解できる可能性がある。
- VLBI (センチ波からサブミリ波) : 輝度温度 3000 K 程度が予想される。
- ng-VLA : SKA phase 2 と同程度の仕様であれば同種の観測が可能である。ただし北天に作る場合は観測天体数に制限がかかる。特に Inner Galaxy で赤緯 17-19h 台の天体を狙う場合は超長基線で低仰角の観測をする必要があり、高周波での較正精度に懸念がある。
- 既存の南天の望遠鏡 : 分解能不足であり、同様な観測は不可能である。
- その他 : TMT では補償光学による回折限界を達成しても分解には至らない。

1.2.6 準備研究案

● **既存の装置での準備研究の可能性**

- VERA/KaVA/JVN/EAVN : 周期変動メタノールレーザー探査からの発展はあり

うる。

- ALMA: 準備研究というよりはむしろフォローアップによる降着系の観測が有意義である。
- 既存の南天の望遠鏡: 脈動にともなう光度変動 YSO の探査を事前に行えれば観測天体の選定に使える。
- SKA precursors または SKA1 (SKA2 から参入ならば): 高視野での電波 YSO 探査を下地できる可能性はある。
- 理論、他波長、その他: 原始星進化理論との協力は必須。また観測可能性の検討についても前景放射/星周構造による遮蔽の影響なども含めて理論研究を進めることが望ましい。

1.2.7 将来計画への展望

- **SKA に参加をするならばどのような資源の整備が必要か?**

大質量原始星に関してまとまった既存グループが国内に存在しないため理論/多波長観測含めた研究グループの整備が必要である。まずは 2017 年度から立ち上がった SKA-JP の星形成に関する科学検討部門の枠組みで検討を進めるべきであろう。

- **SKA に参加をするならばどのようなテーマの研究を始めるべきか?**

上記でも述べたように膨張期の原始星撮像を効率良く進める上では、まずレーザー変動も含めて原始星の偏光現象に関する研究を進めておくことがターゲットの絞り込みに繋がる可能性が高い。特に電波帯では個別 YSO レベルでの変動はレーザー以外のほとんどモニターが行われていないのが現状である。仮に第 3 期中期計画以降に国内に独自の小/中規模装置を置くのであれば、ある程度の分解能 (< 0.1 秒角) と感度 (~1 mJy) を保った上で、そうしたモニターが可能な装置が観測パラメータスペースを埋める上でも有用だと考えられる。

参考文献

ALMA Partnership et al. 2015

Hosokawa & Omukai 2009

Inayoshi et al. 2013

Lim et al. 1998

Machida et al. 2008

**** et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 121

**** et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 152

1.3 銀河系・アストロメトリ(坂井伸行)

1.3.1 背景(これまでの研究とその問題点や限界)

2000年代以降、史上最高の空間分解能を達成してきた VLBI 観測によって、銀河スケール (10 kpc) における天体の年周視差計測、固有運動測定が進められてきた (e.g., Reid & Honma 2014)。VLBI 位置天文観測 (研究) によって、銀河系の詳細な構造が分かっただけでなく、個々の天体の正確な物理量の導出が可能になり、宇宙の距離梯子の根幹部分が強固にされてきた。

一方で VLBI 位置天文研究は、北天の観測装置を使って進められてきた経緯から、南天における観測が十分でない。Gaia 衛星が 2020 年代に、全天の年周視差計測を VLBI 観測と同程度の精度で行うとはいえ、Gaia は銀河面の観測は可視光観測のため不得手なので、依然として VLBI 位置天文研究を、南天に拡張していくニーズが残っている。

さらに踏み込むと、既存の VLBI 装置や Gaia の観測精度は、10 マイクロ秒角である (10 kpc の距離測定が 10% の精度で行える)。太陽系の銀河中心距離 $R_0 =$ 約 8 kpc である現実を踏まえると、5 マイクロ秒角の観測精度が達成できると、銀河系中心以遠の位置天文研究が可能になり、本当の意味での銀河系構造の全容が解明できる。

2020 年代から初期運用が始まる SKA を用いた、VLBI 位置天文研究の議論は既に始まっている。圧倒的な感度の向上により、熱雑音をベースにした位置天文観測の精度として、5 マイクロ秒角が想定されている。1.3 節では、SKA 位置天文研究における国際的な議論状況と、今後解決していくべき課題、実行すべき準備研究について、水沢 VLBI 観測所との繋がりを

表 1.3.1: 現在検討されている SKA アストロメトリ(位置天文)観測によるサイエンスの例

観測対象	サイエンス・多波長とのシナジー	視差精度 (μ as)	天体数 (SKA1/2)	SEFD (SKA1/2)
1.6 GHz OH メーザー	銀河間物質循環・磁場構造 既知の P-L 関係の拡張 (高質量放出天体も加える)	< 20	数千天体 / "	~2 Jy / ~0.2 Jy
6.7 & 12.2 GHz CH ₃ OH メーザー	天の川銀河渦状腕構造 YSO の磁場構造	5	300-400 / 400-600	~3 Jy / ~0.2 Jy
22 GHz H ₂ O メーザー	天の川銀河渦状腕・棒状構造 銀河間相互作用	5	~1,000 天体 Valdettaro+01	— / ~0.5 Jy
連続波天体 (例: Radio star; パルサー; QSO)	Gaia の結果のキャリブレーション. ALMA 天体の物理量較正. 強重力場の研究. 背景重力波 の検出.	~10	3699 [†] Paragi+15	観測周波 数(帯域) に依存す る

*Green et al. (2015), Paragi et al. (2015), SKA Community Briefing (2017 Jan 18) の資料を基にして作成. [†]Gaia で観測可能な Radio star が, 3699 天体リスト済み.

意識しながらまとめていく。

表 1.3.1 は、SKA 位置天文観測によるサイエンスケースの一例である。また、SKA 位置天文研究を議論している論文として、以下の 2 遍に簡単に触れる。

1a. Green et al. 2015 : Maser astrometry for Galactic science (AASKA14 119)

大質量星形成の指標となる 6.7 & 12.2 GHz CH₃OH メーザーの位置天文観測を 1000 天体分おこない(既存の統計サンプルが一桁向上)、銀河系の渦状腕構造と力学を研究する。

1b. Green et al. 2015 : Maser astrometry for extragalactic science (AASKA14 119)

これまで銀河系が主対象であった**位置天文研究を、局部銀河群に広げることが議論されている**(メインは固有運動計測; 例: 大小マゼラン雲の固有運動計測)。詳細は論文を参照。

2. Han et al. 2015 : Three-dimensional tomography of the Galactic and Extragalactic Magnetic medium with the SKA (AASKA14 143)

パルサーの正確な距離を SKA 位置天文観測(SKA-VLBI)とパルサータイミング観測で求め、DM や RM 観測の結果と組み合わせることで、銀河系および銀河間における、磁場構造、電子密度分布を明らかにする研究が紹介されている(詳細は論文を参照)。

1.3.2 SKA で目指すサイエンス

● 概要、意義

タイトル: SKA 位置天文観測による銀河系構造の全容解明

概要: SKA 位置天文観測を行い、これまでの銀河系構造研究で未開拓となっている南天領域、および銀河系中心以遠の構造を初めて明らかにする(図 1.3.1)。

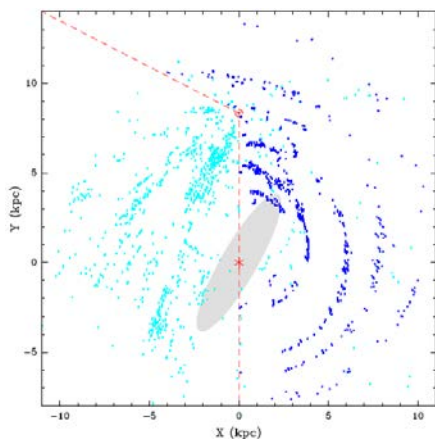


図 1.3.1. Reid et al. 2016a より :

約 2,000 天体の星形成領域の分布. 距離の推定には、VLBI 位置天文観測の結果が利用されている. 南天領域(～図中破線部の左側)については、VLBI 観測の結果が不足しており、距離推定の誤差が大きくなっている.

● 何が新しいか?

➤ これまでの世界での研究、あるいは VLBI、水沢での研究との比較

- 想定されている周波数/空間分解能としては現行 VLBI と同程度。
- 観測ターゲットが、南天および銀河系中心以遠である点が異なる。

➤ どう質的転換?

- 銀河系南天領域における(渦状腕)構造が、初めて観測的に明らかになる

(ただしこれは、Gaia 衛星でも同様に明らかにできる)。

- 一方で銀河系中心以遠の構造については、SKA 位置天文観測で 5 マイクロ秒角の年周視差精度が達成できれば、初めて明らかにできる。

➤ **どう量的転換(定量的に)?**

- SKA1-Mid で対象となる CH₃OH メーザーについては、1500 時間の観測で 300 天体の年周視差計測が見積もられている(Green et al. 2015)。メーザー天体の検出感度は 0.7 Jy で、既存の南天 VLBI 観測装置 LBA に比べて、**10 倍感度が向上**する。銀河系構造研究に関する南天位置天文観測は、LBA によって約 20 天体分行われており(ATNF proposal V255; 2 天体が出版済み = Krishnan et al. 2015 & 2017)、SKA1 の段階で、**10 倍以上の観測天体数増加が見込まれる**(ちなみに SKA2 は SKA1 にくらべ、さらに 10 倍以上感度が向上する)。

1.3.3 日本、水沢、VLBI などの独自性・優位性

- **我々の現在の研究がどう発展できるか?**

現在の研究の延長線上にあり、2020 年代以降に銀河系構造研究を主導するのは、VLBI アレイ(e.g., SKA)、Gaia(可視光)、JASMINE(赤外線)などである。

- **我々の過去の経験や蓄積(位置天文やデータ較正、電波干渉計、VLBI など)がどう生かされるか?**

VERA で行っている 6.7 GHz 位置天文観測・データ解析の経験が、そのまま生かされる。22 GHz 帯の位置天文観測では、電離層遅延較正を GPS データに基づいて行っており(Global models; Walker & Chatterjee 1999)、遅延残差は ~1 cm である。電離層遅延は周波数 ν のマイナス二乗に比例するので、6.7 GHz では ~10 cm に相当し、この残差をキャリブレーションしない限り、目標精度 5 マイクロ秒角は達成できないと考えられる。

現在主に 2 種類の電離層遅延較正手法が、SKA 時代の低周波数帯(< 10 GHz) 位置天文観測のために提案されている。①”In-beam”位置天文観測(e.g., Asakai et al. 2007)と②”Multi view”位置天文観測(e.g., Rioja et al. 2009, 2017; Reid et al. 2017 submitted)である。①は、目的天体(e.g., メーザー天体)と同一視野内の位相参照天体(QSO)を同時に観測する手法で、②は複数視野を同時もしくは準同時に観測し、目的天体と複数の参照天体(≥ 3 天体)を観測する手法である。

Reid et al. (2017 submitted)では、6.7 GHz VLBA データを用い、電離層遅延残差の較正手法を紹介している(図 1.3.2)。図 1.3.2 では、個々の位相参照源を使って求めた年周視差の結果に、系統的なズレが見られる。毎回の観測における(メーザー天体の)絶対位置計測においても、同様のズレが発生していることが分

かっている。毎回の観測で天球面上に発生する位置ズレを、複数の QSO を使っ

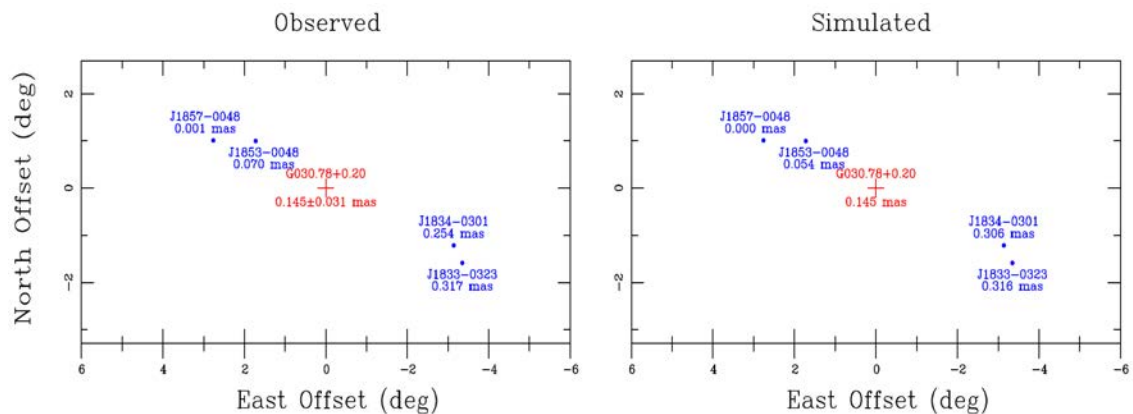


図 1.3.2. Reid et al. 2017 submitted より : (左) 6.7 GHz 位置天文観測の結果. 赤字が最終的な年周視差の結果. 青字は各背景参照源と、その参照源を使って得られた年周視差の結果. 天球面上に、年周視差の系統的な勾配が見られる(南西→北東方向). 赤字の結果は、その勾配を補正して求めた結果である(本文参照). (右)シミュレーションの結果. 毎回の観測で、0.1 mas/deg の位置オフセットが、天球面上のランダムな方向に発生することを仮定している. 観測結果(左)同様に、天球面上に年周視差の勾配が見られる.

て補正することで、最終的な年周視差計測に成功している。

- **我々の先行研究や独自性は？**

VERA グループでは装置の広帯域化が進められている(1 Gbps から 8 Gbps になり、連続波天体の感度が $\sqrt{8}$ 倍向上する)。適当な天体を選別し、6.7 GHz ”In-beam” 位相補償観測・解析を進めていけば、SKA 位置天文観測でキーとなる、電離層遅延校正の準備研究が独自に行える(実際に上記の観測が、現在 VERA で進められている)。

1.3.4 必要なスペック

- **何が最も重要な特徴か？**

- **感度**

In-beam 観測、Multi-view 観測ともに、感度が最重要項目である。例えば、1.6 GHz 帯で目的天体の 60 秒角以内に存在する QSO を In-beam 観測する際は、SKA1 の感度をもってしても QSO の数密度が足りないという試算がある(Paragi et al. 2015)。同様の数密度の試算として、Godfrey et al. (2011)の SKA シミュレーション研究を参照すると、5 GHz までは In-beam 観測、それより高い周波数帯では Multi-view 観測(In-beam 観測よりは離角の制限が緩い~数度まで許容)が、SKA 位置天文観測に要求される。

- **空間分解能:**
既存の VLBI 観測装置と同程度で十分。低周波数帯での位置天文観測では、**QSO の構造が観測精度に影響する可能性があるので、注意が必要。**
- **視野**
In-beam 観測は、アンテナの単一ビーム内で行われる。Multi-view 観測で同時に複数視野を観測する場合は、アンテナに **phased-array-feed と beam-forming module などの搭載が必要**(Rioja et al. 2009)。
- **時間分解能**
年周視差計測は地球の公転運動を利用した観測なので、メーザー天体が光度変動していなければ、数ヶ月の時間分解能で十分。
- **周波数帯**
1.6 GHz (OH メーザー)、6.7 GHz (CH₃OH メーザー)、22 GHz (H₂O メーザー) が、メーザー位置天文観測のメインとして考えられる。

- **SKA1 で可能か？SKA2 を待たなければならないか？**

- SKA1 単独では無理だが、ASKAP や LBA を組み合わせることで、部分的には位置天文研究を行える(観測周波数は 10 GHz 以下)。
SKA2 になると、H₂O メーザーも含めた位置天文研究が可能になる。

1.3.5 SKA の必然性

- **他の装置での可能性？**

- **LBA:** 部分的には可能だが、LBA の 6.7 GHz 位置天文観測では、系統誤差(電離層較正残差)の影響で、期待される位置天文精度が達成できていない(Krishnan et al. 2017)。In-beam/Multi-view 観測ともに感度が高い方が有利なので、SKA が必須である(SKA には phased-array-feed と beam-forming module が搭載されることも特記事項である)。
- **その他:**
EAVN を用いて、条件の良い特定の天体に対する準備研究(In-beam 観測)は可能である。

1.3.6 準備研究案

- **既存の装置での準備研究の可能性**

- **VERA/KaVA/JVN/EAVN:** 条件の良い天体を選べば、既存の装置でも準備研究は可能(In-beam 観測)。
- **VLBA:** 同上。
- **LBA:** 同上。

- **理論、他波長、その他:** 可視光(Gaia)、赤外線(JASMINE)位置天文観測とのシナジーが考えられる。

1.3.7 将来計画への展望

- **SKAに参加をするならばどのような資源の整備が必要か?**

In-beam 観測の場合: 連続波観測のために広帯域化。

Multi-view 観測の場合: 広帯域化は In-beam 観測と同様に必要。複数視野の確保の為に、ファーストスイッチング観測で準同時に参照電波源(QSO)を観測するか(Reid et al. 2017 submitted 方式)、phased-array-feed と beam-forming moduleなどを搭載し、multi beamの能力が必要。

- **SKAに参加をするならばどのようなテーマの研究を始めるべきか?**

熱雑音で決まる位置天文精度 5 マイクロ秒角を達成し、銀河系構造研究にブレークスルーをもたらすためには、位相較正(大気較正; 電離層較正)の議論が必要不可欠である。既存の観測装置で準備研究(データ解析の手法の確立)を進めていくことが重要である。

参考文献

- Asaki et al. 2007, PASJ, 59, 397
Corbel et al. 2015, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 053
Godfrey et al. 2011, SKA Memo No. 135
https://www.skatelescope.org/uploaded/16339_135_Memo_Godfrey.pdf
Green et al. 2015, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 119
Han et al. 2015, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 041
Krishnan et al. 2015, ApJ, 805, 129
Krishnan et al. 2017, MNRAS, 465, 1095
Loinard et al. 2007, ApJ, 671, 546
Paragi et al. 2015, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 143
Reid & Honma 2014, ARA&A, 52, 339
Reid et al. 2014a, ApJ, 783, 130
Reid et al. 2016a, ApJ, 823, 77
Rioja et al. 2009, Proc. 8th International e-VLBI Workshop, PoS(EXPReS09), 014
Rioja et al. 2017, AJ, 153, 105
Valdettaro et al. 2001, A&A, 368, p. 845-865
Walker & Chatterjee 1999, VLBA Scientific Memo 23,
<https://library.nrao.edu/vlbas.shtml>

1.4 活動銀河核 AGN(秦和弘)

1.4.1 背景(これまでの研究とその問題点や限界)

AGN はその構成要素の複雑さ、幅広い空間スケールレンジ、観測波長レンジ、そして宇宙論的進化を伴うことから、「AGN に関連するサイエンス」は多岐にわたるのが特徴である。実際 AASKA Science Book においても複数のカテゴリー(Transient Universe, Continuum Universe, Magnetism, Synergy and Other Science)にまたがり数多くの AGN 関連サイエンスが展開されている(e.g., Agudo et al. 2014; Paragi et al. 2014; Orienti et al. 2014; Giroletti et al. 2014)。筆者がここでその全て(及びそれらに関連付けた SKA サイエンスや水沢 VLBI 観測所に必要とされる方針)をカバーするのは困難であるため、以下では主に筆者を含め日本の VLBI-AGN コミュニティがこれまで得意としてきた範疇でのトピックを中心に議論・検討を展開していく。

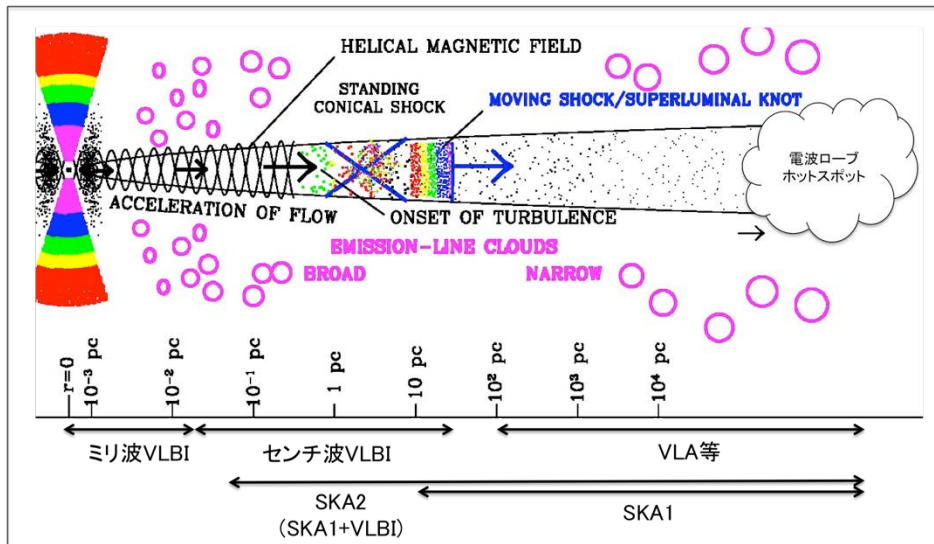


図 1.4.1. AGN ジェットの内部構造および様々な望遠鏡での観測可能スケール比較(Marscher 図を一部改変)。SKA の分解能・感度・uv カバレッジではジェット生成・収束・加速領域($<1\text{pc}$)から終端のホットスポット($>10\text{kpc}$)に至る一連のエネルギー輸送を完全にカバーできるかもしれない。

VLBI を用いた AGN 研究では、高空間分解能による巨大ブラックホール(BH)近傍の高輝度・高エネルギー現象が主要ターゲットであり、特に電波銀河やブレイザーを対象に相対論的ジェットの生成・加速・収束領域、磁力線構造(偏波観測)の探査が活発に行なわれてきた。そして近年はミリ波 VLBI 観測網(EHT)の躍進により、一部の天体ではジェット駆動領域や BH 周辺構造がホライズンスケールで観測可能になりつつある。また、X 線/ガンマ線望遠鏡との合同観測による高エネルギー放射領域・粒子加速領域の探査も近年の大きな潮流の1つとなっている。

しかし既存の VLBI アレイで個別に研究対象となりうる天体は極めて明るい天体に限られ、センチ波 VLBI では 100 のオーダー(e.g., MOJAVE; Lister et al. 2009)、EHT に至っては 10 のオーダーである(偏波観測となると天体数はさらに減少)。また、結合型干渉計に比べ貧素な uv カバレッ

ジで画質も悪い。そのためこれまで VLBI/EHT を用いて得られた観測的知見はおそらく極めて限定的であり、実際、ジェットの内外部・磁場構造や駆動メカニズムについては理論モデルと観測に依然大きな隔たりがあり混沌としている(あるいは理論モデルと直接比較に耐えうる観測データや天体が十分でない、とも言える; Agudo et al. 2014)。また、ジェットは中心エンジンから数桁の距離オーダーにわたってエネルギーを運ぶ伝搬現象であるため、ある特定の場所だけでなく、上流(生成領域)から伝搬、下流(終焉)まで広範囲にわたって観測することが本質的である。

ミリ秒角スケールの分解能を持ち、既存の結合型干渉計以上の感度と uv カバレッジを持つ SKA では、より多くの近傍天体に対し、(現在 M87 で行なわれているような)pc-kpc の広範囲のジェット構造・磁力線構造のイメージング研究が可能になるだろう。そして M87 のような既に研究が進んでいる幾つかの個別天体についても、高ダイナミックレンジイメージにより円盤からの wind 成分のような更に外側の低輝度成分が発見される可能性がある。また、感度の向上により電波で暗い AGN 種族や high-z AGN の観測天体数も増え、AGN の統一モデルや宇宙論的進化についても統計的研究が大きく進展すると期待される。

1.4.2 SKA で目指すサイエンス

- 概要、意義
 - 相対論的ジェット
 - 生成・収束 (超高ダイナミックレンジイメージ)
 - 加速・速度場 (モニターというよりは、超高精細な輝度分布を利用)
 - 磁気駆動パラダイム (高感度偏波観測による磁場の役割・形状・強度)
 - 多層構造/spine-sheath パラダイムの検証 (eg, wind 成分の検出)
 - FR-II 型ジェット駆動領域 (FR-I 型の比べて高感度必要)
 - 組成 (円偏波観測によるペアプラズマ vs 通常プラズマの切り分け)
 - ガンマ線放射領域・機構
 - 粒子加速の素過程 (衝撃波、再結合、乱流)
 - 外界との相互作用 (KH 不安定性、シア加速)
 - kpc-電波ローブ-hotspot の内部構造
 - Radio quiet AGN
 - BAL/NLS1/LLAGN/Unidentified γ 線源など
 - AGN 進化
 - 宇宙最初 ($z > 10$) の SMBH/クエーサー
 - バイナリー-SMBH
- 何が新しいか?
 - これまでの世界での研究、あるいは VLBI、水沢での研究との比較
AGN ジェット観測では高い感度・画質・空間分解能の 3 要件を満たすことが理想的だが、これまでの電波観測装置ではこの全てを同時に満たす観測

は実現できなかった。SKA ではこの3要素を同時に満たす観測が実現し、ジェット駆動領域から終端領域に至るイメージングが高い感度・画質・ミリ秒角で初めて実現するという点で新しい。

➤ どう質的転換？・どう量的転換（定量的に）？

質的転換：理論的に予言されていたが未だ検出されていない成分（ヘリカル成分や wind 成分など）が見える可能性があり、ジェットの収束や周囲との相互作用、関連して起こる境界面での不安定性の理解が大きく高まる。偏波についても、感度向上によりこれまでほとんど検出がない円偏波(0.1%程度)の研究が飛躍的に進む可能性がある。

量的転換：検出限界が1~2桁向上するのに伴いAGN連続波源の絶対検出数も約1-2桁増えるだろう。M87のような個体として詳細研究可能なジェット天体も、単純に見積もると現在の10のオーダーから100-1000のオーダーに増えると予想される。

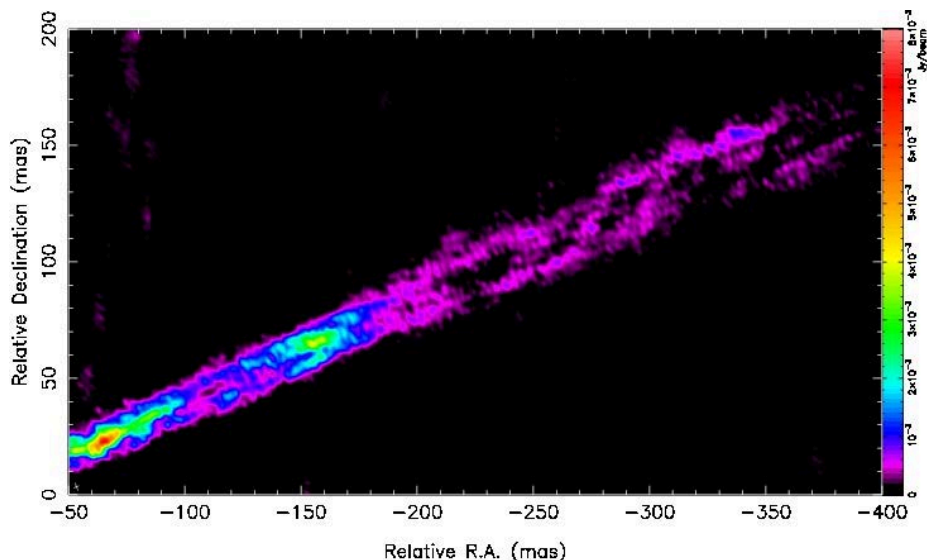


図 1.4.2. 地上「29局」が参加したM87の1.6GHzグローバルVLBIイメージ。非常に高品質なuvカバレッジにより、これまでのVLBA10局等では見えなかった2重ヘリカル構造（らしきもの）が初めてイメージングで見つかった(Savolainen et al. in prep)。

1.4.3 日本、水沢、VLBIなどの独自性・優位性

AGNについては、これまで日本のVLBIグループがVSOPやVERA/KaVA/VLBAを通して切り開いてきたセンチ波VLBIのサイエンス（ジェットの内部構造、多層構造、加速・収束・伝搬、偏波によるヘリカル磁場、ガンマ線放射領域、周辺物質との相互作用、LLAGN/NLS1/BALといったRQ-AGN等）がまさにSKAで探査可能なサイエンスに一致しており、我々はその高感度バージョンとして発展できる。

また、AGNのコアシフト測定においてVERA位置天文や電離層補正の経験が生かされるだ

ろう。特に 1GHz 前後の低周波ではコアシフトは 1mas~数 mas を上回る可能性があり、AGN を位置参照源とする他のアストロメトリ研究にとってもコアシフトがかなり影響を与える可能性がある。

1.4.4 必要なスペック

- 何が最も重要な特徴か？
 - 感度：電波観測として現在最高レベルのイメージ感度(~5 μ Jy)で近傍電波銀河ジェット伝搬スケール(>pc-kpc)をイメージングし、磁場や速度場を詳細に算出した Laing らの一連の VLA 観測(eg, Laing et al. 2002; 2014)を参考にしてみると、このような観測が成功している天体は 10 天体程度しかない。ゆえにこのような研究が可能な天体数を(少なくとも)あと 1 桁増やすためにはおおよそ~0.5 μ Jy というのが 1 つの基準になるだろう。
 - 空間分解能：ジェット内部構造や SMBH 周辺構造、関連する高エネルギー現象の観測には高分解能(ミリ秒角スケール)が本質的である。
 - 視野：個別天体を研究する限りでは、Cygnus A や M87 電波ローブの広がりを考えて、数 arcmin 程度あれば多くのジェット天体で kpc スケールまで一度にイメージ可能。
 - 時間分解能：SKA 周波数帯における AGN の時間変動成分は多くの場合数日~数ヶ月のため(コンパクト領域=>大きな光学的厚み、広がった領域=>空間スケール大きい)、既存の装置でも大体 OK。Intra-day variables (IDV) のような特殊な AGN 種族を詳しく調査したい場合はこの限りではない。
 - 周波数帯：AGN では「幅広い観測周波数」が理想的。BH 近傍構造を探索するサイエンスでは高分解能・高透過率な 8GHz, 15GHz, (可能なら 22GHz) まで受信できると良い(ミリ波 VLBI 観測領域と部分的にオーバーラップ可能)。逆に kpc/Mpc スケール構造や AGN と外界との相互作用、ジェット組成や粒子加速を探索する場合は低周波(8GHz 以下)が効果的。

- SKA1 で可能か? SKA2 を待たなければならないか？
 - SKA1 : kpc/Mpc スケールの構造については、100km 基線の SKA1 で既存の VLA 等による観測を凌駕するイメージングが十分可能と考えられる。
 - SKA2 : pc スケール、BH 周辺構造を狙うサイエンスはミリ秒角レベルが実現できる SKA2 を待つ必要がある、SKA1 では既存の VLBA や EAVN を用いた観測の方が有利な可能性すらある。あるいは、SKA1 時代にミリ秒角スケール探索を求める場合は、SKA1 を VLBI 局の 1 局として、外部のネットワークと組むことで実現可能(例: SKA1+EAVN)。

1.4.5 SKA の必然性

- 他の装置での可能性？
 - ALMA：ALMA 単体では解像度は VLA と同じ。かつ AGN の非熱的放射は多くの場合センチ波に比べ弱いいため、ジェットや BH 近傍を研究するには難しい。
 - VLBI(センチ波からサブミリ波)：ミリ波 VLBI は AGN の BH 最近傍探査に特化しており、目指すサイエンス・興味ある空間スケールが大きく異なる。一方センチ波 VLBI はジェットの伝搬スケールをミリ秒角で探査できるが、感度や uv カバレッジが悪いため、微弱な構造や淡い構造を高画質で観測できない。
 - ng-VLA：もし「VLA 同等以上の感度で VLBA 並の解像度」というスペックが実現するのであれば、ここで述べたテーマの多くは実現できる可能性あり。
 - 既存の南天の望遠鏡：AGN 分野では LBA や ATCA が主要望遠鏡。これらは VLBA または VLA をややダウングレードしたものと考えればよい。

1.4.6 準備研究案

- 既存の装置での準備研究の可能性
 - VERA/KaVA/JVN/EAVN
 - 感度と撮像性能がクリティカルな AGN サイエンスにとっては、高感度・高密度 uv を持つ EAVN は SKA に向けた強力なパスファインダーになりうる。
 - 重要/有名天体のジェットのフルトラックイメージング
 - RQ-AGN/LLAGN 等の EAVN サーベイ
 - EAVN によるセンチ波高感度キャリブレーションサーベイ
 - これらの準備研究を段階的に発展させる上でいずれ FAST-EAVN の連携が鍵。そのためには EAVN L/S-band の整備を真剣に検討する必要あり？

1.4.7 将来計画への展望

- SKA に参加をするならばどのような資源の整備が必要か？

[短期的] 自らの手で準備研究を着実に進めるという意味でも、SKA 周波数帯をカバーしパスファインダーとして使えるマイテレスコープを持つ必要がある。日本・東アジアでは（これから FAST が稼働することも踏まえ）EAVN が最も有力な候補の 1 つであり、プラクティカルには現在手薄な EAVN 低周波受信の整備を進めることが必要となる。

[長期的]「これまで日本が培ってきた独自性」と関連する SKA 時代の 1 つの可能性であるが、SKA 周波数帯でスペース VLBI は検討すると面白いかもしれない。AGN 研究にとっては空間分解能が本質的であり、低周波での高感度・高分解能イメージングはこの分野に全く新しい知見をもたらす可能性がある。実際、最近結果が出始めた RadioAstron 1.7GHz による M87 ジェットのイメージでは、軸中心の細くまっすぐな「spine」成分に加え、その周囲に誰も見えると予想していなかったヘリカルなフィラメント構造を捉えつつある。SKA 時代は VSOP/RadioAstron 時代に加え地上局の感度、uv カバレッジが飛躍的に向上するため、(仮に VSOP と同じ性能の衛星を打ち上げたとしても) ジェットの内部構造の理解が大きく進展する可能性がある。

- SKA に参加をするならばどのようなテーマの研究を始めるべきか？

これまで日本の VLBI グループはスペース VLBI やミリ波 VLBI に代表されるように「より BH の近くへ」を主なモチベーションとして研究を展開してきたが、低周波ではより外側(下流)を意識した研究テーマを着想・展開していく必要がある。EAVN によるジェット伝搬領域の高ダイナミックレンジ撮像や、FAST-VLBI を用いた低周波高感度サーベイ等で準備研究を進めていくことが重要である。

参考文献

- Agudo et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 093
Giroletti et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 153
Laing et al. 2002, MNRAS, 336, 328
Laing et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 107
Lister et al. 2009, AJ, 138, 1874
Marscher et al. Website of Boston University Blazar monitoring group
Orienti et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 087
Paragi et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 143
Savolainen et al. Presentation at the M87 Workshop in Taiwan, 2016

1.5 トランジェント（新沼浩太郎）

1.5.1 背景(これまでの研究とその問題点や限界)

広視野で全天球面を監視するような観測が実現すれば、未知天体からの電磁波放射が高い確率で偶発的に検出され、新たな天文学分野が創造される可能性が飛躍的に高くなる。例えば、突発的な高エネルギー天体現象の代表にもなっているガンマ線バーストについては、宇宙望遠鏡による監視によってその存在が知られるようになったが、21世紀に入って以降、より分解能の高いX線望遠鏡や可視光望遠鏡による即座の追観測体制構築により遠方銀河に付随するような宇宙論的距離で発生している現象であることが明らかになった（e.g, Kawai et al. 2006）。このように対応天体を特定できたことにより、残光の多波長観測や理論的研究が進み、それにより、その発生・放射機構についての研究に大きな進展があった。

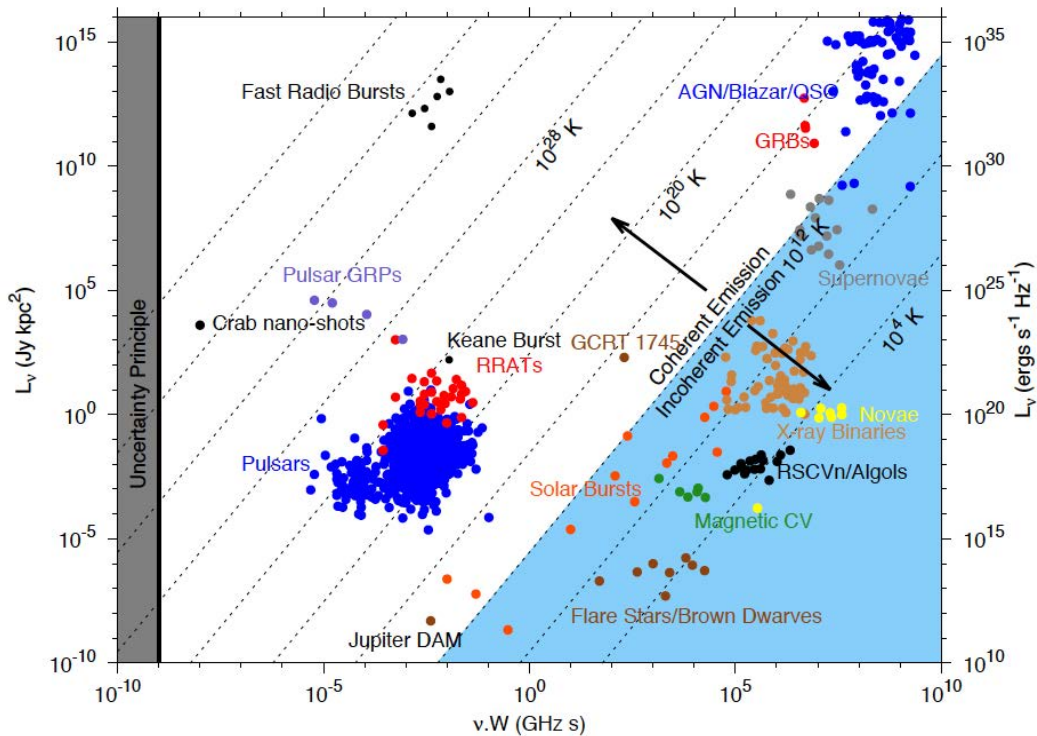


図1.5.1. 電波帯における既知の突発現象・変動現象のパラメータ空間(Pietka et al. 2015)。縦軸は光度，斜線は輝度温度を表す。横軸は周波数と継続時間の積を示す。1 GHz付近で検出されている現象が多いため，横軸はほぼ継続時間（単位：秒）を表していると考えて良い。明らかに1日以下の時間スケールの領域が大きな空白となっていることが分かる。

電波帯においても、超新星爆発や白鳥座X-3の電波バースト（e.g., Gregory & Kronberg 1972）に見られるような突発的なバースト現象は、多くの研究者が注目し研究の対象とし

てきた。しかしながら、高エネルギー領域に比べ電波帯においては広視野での観測を行うことのできる装置が無かったため、銀河中心領域や個別天体に対象を絞りモニター観測を行う、もしくは他波長からのアラートにより追観測を行う、という手法で突発現象の研究が行われてきていた。また、電波帯（特に低周波帯）でも広視野及び時間領域に注目した観測・解析手法の検討が行われ始めてきたが、特に（撮像はせずに）時間領域に注目した解析により、これまでの電波観測では知られていなかったような突発的に輝く電波天体が見つかり始めてきた。これら突発的な電波天体について最も特徴的なのは、その多様な継続時間スケールにある（図1.5.1参照）。これら突発的な電波天体は大きく分けて、継続時間の短い（1秒以下：Fast Transient）ものと継続時間の長い（秒スケール以上：Slow Transient）ものに分けられている。

1.5.2 SKA で目指すサイエンス - Slow Transient

- 概要、意義

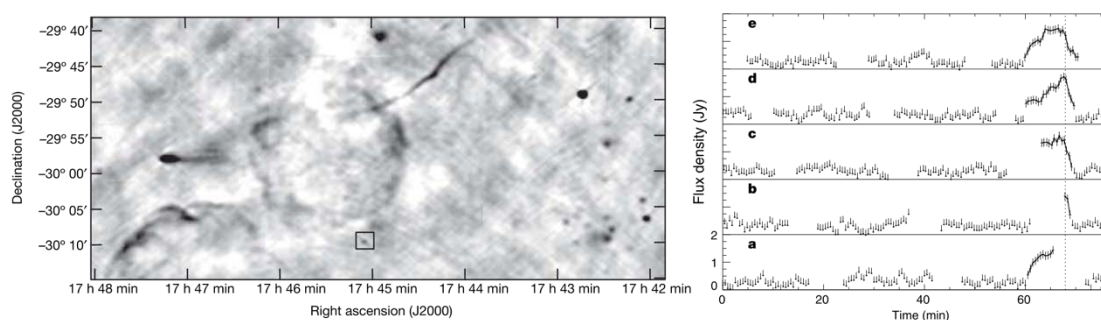


図 1.5.2. 銀河中心領域にて発見された分スケールの継続時間を示す再帰的な電波トランジェント GCRT 1745-3009。左図の黒い四角が GCRT1745-3009 の検出された場所である。右図からは継続時間 10 分程度のバーストが約 77 分周期で 5 回 (a~e) 検出されていることが分かる (Hyman et al. 2005)。

Slow Transients の例として、正体不明のものであれば銀河中心領域における再帰的な電波バースト(Hyman et al., 2005, 図 1.5.2) や高銀緯で検出されたもの(Niinuma et al., 2007, Jaeger et al., 2012) などが報告されており、起源の特定できている現象でも潮汐破壊現象 (e.g, Zauderer et al., 2011) や低質量ブラックホール連星のアウトバースト (e.g., Kimura et al. 2016) など興味深い現象が報告されている。

また先行研究においても Bower et al. (2007)で報告された数ミリ Jy レベルかつ分スケール以上の継続時間を持つ電波トランジェントが compact binary merger の残光である可能性が示唆されている (Naker & Piran 2011)。従って重力波天文学とのシナジーという観点からもこのような現象は重要なターゲットになるはずである。

これら突発的な電波天体の起源・放射機構などを理解するためには、他波長との連携による共同観測体制の構築がもちろんのこと、非常に広い視野を監視しつつ、視野内の電波天体を高い角度分解能で観測することのできる電波望遠鏡の登場が必須である。

- 何が新しいか？

- これまでの世界での研究、あるいは VLBI、水沢での研究との比較

LOFAR の登場により、電波においても広視野サーベイ (0.1 str @ 120MHz, 0.2 str @ 30MHz をリアルタイムでモニター可能¹⁾) を行うことができるようになってきた。しかしながら、数 100 MHz 以下の周波数帯における観測では背景ノイズなども比較的大きく、特に電波トランジェントに関しては当初期待されていたほどの結果は得られていないようである。

近年の観測システムロボット化により、電波干渉計であってもガンマ線バーストの電波残光を始めて 1 日以内に追観測することができるようになったため、光度曲線のピーク及びピークに達するまでの時間を高い精度で捉えることができるようになった (Anderson et al. 2014)。一方、従来の VLBI ではターゲット観測が主体となるため、追観測を行う場合であっても継続時間が数日を切るようなイベントの追観測、あるいは 1 日を切る即応性を持たせることは難しい。

- どう質的転換？・どう量的転換 (定量的に) ？

パルサーなどのように秒を切るような時間スケールの現象に限らず、分スケールの変動現象も電波帯ではモニター/フォローアップとともに光度曲線 (時系列の強度情報) のみでの研究が主体であった。電波帯の強みである高解像度画像観測による能動的な突発現象サーベイを行えるようになれば、突発現象を捉えるとともに、母銀河及びその中での発生位置の特定が仮定なく行える可能性があるため学問的にも大きな質的転換をもたらすと期待できる。

1.5.3 日本、水沢、VLBI などの独自性・優位性

- 発生位置特定に必須な位置測定精度・技術→放射起源の解明
- 構造の変化を追うことのできる角度分解能→放射機構の理解
- Snap-shot による短時間イメージング→構造変化と強度変化の関係の特定

¹ <http://www.lofar.org/astrophysics/transients-ksp/technical-description/technical-description>

1.5.4 必要なスペック

- 何が最も重要な特徴か？
 - 感度：観測対象により異なるが、Nakar & Piran (2011) が示唆する中性子星連星の合体による電波残光の場合であれば $\sim 100\mu\text{Jy}@10\sigma$ @数分積分の感度が要求される。一方、SKA Document によれば SKA1-MID で予想される到達感度は積分時間 1 分で $\sim 6\mu\text{Jy}@1\sigma$ であるため、十分対応可能である。
 - 空間分解能：
 - 母銀河の特定： ~ 1 秒角
 - 出現位置の特定： ~ 10 ミリ秒角（位置決定精度 < 10 ミリ秒角）
 - 構造の変化： ~ 1 ミリ秒角
 - 視野：他波長との連携という立場で考えるのであれば 100 平方度を超える視野が必要（処理可能な相関器の開発も必須）
 - 時間分解能： \sim 分
 - 周波数帯：SKA1-MID で良い
- SKA1 で可能か？SKA2 を待たなければならないか？
 - SKA1： Δ （TDEs などの既知イベントについては構造の変化も重要であるため、即座に検出の認識及び SKA-VLBI あるいは他装置による追観測へ移行する体制構築が必須）
 - SKA1 で現状検討されているサーベイ仕様（全天サーベイモード：8000 時間/5 年（数分/視野） \rightarrow 次に同天域を観測するのは 5 年後）²では、出現イベントに対するフレキシブルな観測を行えないため、他装置による追観測体制を整えない限り分から日スケールの現象を詳細に観測することはできない
 - SKA2： \bigcirc （現在の夢のようなスペックが実現するなら）

1.5.5 SKA の必然性

- 他の装置での可能性？
 - ALMA：不可（時間分解能、一部の現象には周波数が不適切）
 - VLBI(センチ波からサブミリ波)：不可（既存のものでは感度・時間分解能に難）
 - ng-VLA：感度・空間分解能は十分と思われるが時間方向のスペックが未知

² SKA1_Generic_Surveys_V0

- 既存の南天の望遠鏡：
 - ATCA, LBA については感度・時間分解能・視野ともに不可
 - Precursor については SKA を見据えた計画であるためここでは触れない
- その他：時間・空間分解能に特化した広視野電波望遠鏡の開発を検討

1.5.6 準備研究案

- 既存の装置での準備研究の可能性
 - VERA/KaVA/JVN/EAVN
 - 広視野サーベイが難しいため、可視光の広視野カメラや高エネルギーの全天サーベイなどからのアラートに即応（数時間以内）するための体制構築はありうる。
 - （上記体制が整えば） $\sim 0.1 - 1 \text{ Jy}$ レベルかつ分スケール以上の突発現象であれば KaVA や EAVN での **snapshot** イメージで構造変化を追える可能性がある。
 - **Commensal** モードの整備（主にバックエンド）：SKA においても整備される予定（Fender et al. 2014）であるが、北天（特にアジア地域）の観測装置に同システムを備えることで準備研究段階のみならず、全天を網羅的に監視可能になるため SKA（南天）時代において重要な役割を担える
 - **Multi-Phase-Center** 相関処理を実用化レベルへ整備：広視野データを現実的な時間で処理する（＝実用化）ための技術の習得は重要

1.5.7 将来計画への展望

既知の現象であれば、SNe や TDEs（当初の見積もりでは SKA 時代には 300-800/年での検出を期待：Fender et al. 2014）などは非常に興味深い研究対象となるはずである。構造変化の観測は重要な情報を与えるため（TDE によるジェットの噴出や、SNe の膨張速度の制限）、VLBI の技術が重要な役割を担えるはずである。また、SKA-JP の Transient WG において日本として押すべきテーマの検討を行っているところであるため、具体的なサイエンス検討の段階になれば情報共有が必要と思われる。

参考文献

- Anderson et al. 2014, MNRAS, 440, 2059
 Bower et al. 2007, ApJ, 666, 346
 Fender et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 051
 Gregory & Kronberg 1972, Nature, 239, 440

Hyman et al. 2005, *Nature*, 434, 50
Jaeger et al. 2012, *AJ*, 143, 96
Kawai et al. 2006, *Nature*, 440, 184
Nakar & Piran 2011, *Nature*, 478, 82
Niinuma et al. 2007, *ApJ*, 657, L37
Pietka et al. 2015, *MNRAS*, 446, 3687

1.6 FRB（本間希樹）

1.6.1 背景(これまでの研究とその問題点や限界)

FRB(Fast Radio Burst)とは1ミリ秒程度の電波バーストがGHz帯で観測される謎の現象である。FRBでは周波数方向に大きな遅延分散が観測されることから、宇宙論的な遠方から電波が到来していると考えられる(図1.6.1)。これまでに10個強の現象が観測されているが、そのうち位置同定および母銀河の撮像に成功しているものは、唯一繰り返してバーストが起こることが知られるFRB121102のみである(Chatterjee et al. 2017)。この天体のみ赤方偏移 $z=0.19$ の矮小銀河で発生していることが確認されているが、それ以外の天体については距離も母銀河も未定であり、FRBの正体は依然として謎に包まれている。この状況を打破してFRBの正体を解明するためには、単発のFRBイベントの位置を正確に測定し母銀河の同定を多数の天体で行うことが必要であり、高い感度と空間分解能、さらには高い時間分解能を持ったSKAが重要な装置となる。

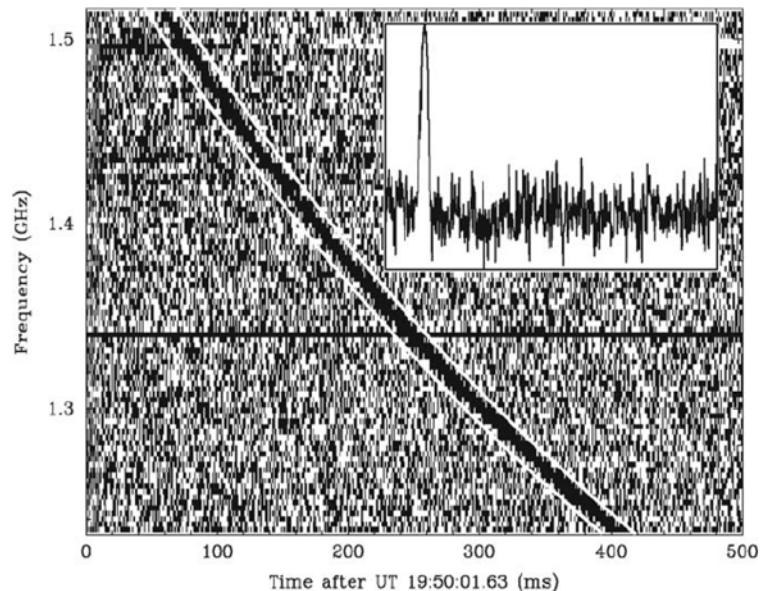


図1.6.1. FRBのL bandのダイナミックスペクトルの例(Lorimer et al. 2007)。高周波から低周波にかけて大きな遅延分散があり、宇宙論的な距離から伝播してきた電波と考えられる。枠内は遅延分散を補正した時系列パワーで、時間方向にわずか1ミリ秒程度の幅しか持たない。

1.6.2 SKAで目指すサイエンス

- 概要、意義

宇宙論的な距離で発生するFRB(Fast Radio Burst)をサーベイ観測により多数発見し、多波長フォローアップ観測を行うことでその正体を解明するとともに、ミッシングバリオンの分布決定などの宇宙論的研究を行う。これまでFRBは10個

強程度しか確認されていないが、これを 1000 個程度に拡充し、その位置決定をリアルタイムで行って多波長フォローアップを進める。FRB では、低周波電波がプラズマ中を伝播することで発生する Dispersion Measure を精密に測定することで、当該天体までのプラズマの柱密度を決定できる。これと、多波長フォローアップ観測による赤方偏移決定を組み合わせることで、宇宙論的なプラズマの柱密度を宇宙論的赤方偏移 z の関数として得ることができ、ミッシングバリオンの分布や宇宙論パラメータの研究を進める。また、1000 個の FRB について多波長フォローアップ観測を行うことで FRB の正体についても解明する。

- **何が新しいか？**

- **これまでの世界での研究、あるいは VLBI、水沢での研究との比較**

FRB の探査は現在 Parkes 望遠鏡などの大型単一鏡を使って行われてきたが、発見頻度が数週間の観測で 1 イベント程度と低く、また位置決定精度も悪かった。SKA では広視野を commensal に観測することで、多数のイベントを発見するだけでなく、高い精度で位置決定し、フォローアップ観測につなげることが可能になる。

- **どう質的転換？**

これまでは正体不明であった FRB について、位置を精度よく決めることで母銀河や FRB の正体解明が初めて可能になる。また、1000 程度の多数の天体について赤方偏移と DM(Dispersion Measure)を決定し、FRB 宇宙論ともいふべき、宇宙の構造を探る新たな分野を開拓できる。

- **どう量的転換(定量的に)？**

例えば Parkes 64m 鏡の FRB 探査では、1 Jy ms 程度の fluence を持つ FRB が十分な感度で検出されている。これと同等の感度は SKA-mid の 15m アンテナを 16 台程度足し合わせたサブアレイで十分に達成されるので、サブアレイでより多くの望遠鏡を用いれば、感度的には現在の装置を大幅に凌駕する観測が達成できる。観測については、2 年で 10000 時間程度を commensal モードで実行するとしており、もし SKA を用いて 1500 ビームで 10000 時間観測すれば、最低でも数 1000 個の FRB の発見が期待できる。ただし、リアルタイムで DM を振りながら複数の視野をサーチする必要があり、計算機資源が最大の課題である。

1.6.3 日本、水沢、VLBI などの独自性・優位性

- **我々の現在の研究がどう発展できるか？**

FRB は日本の電波望遠鏡での観測実績はまだなく、電波観測的には国際的な流れから behind している。一方、単発バーストの干渉計での高精度な位置決定例

はないので、今後それを目指した活動が必要であり、国内でも準備が進められている。一方、すばる望遠鏡を用いた光赤外の follow-up についてはすでにチームが形成されて優れた成果を挙げており、国際的に見ても大きな優位性を持つ。

- **我々の過去の経験や蓄積(位置天文やデータ較正、電波干渉計、VLBI など)がどう生かされるか？**

デジタルバックエンドやソフト関連の技術を有効に活用できる。また、VERA を用いて commensal な観測を S バンドで行えば、いきなり 10 ミリ秒角の精度で位置決めが可能となり、この分野で世界をリードすることも可能である。

- **我々の先行研究や独自性は？**

Commensal モードの構築のために、これまで開発した HDD ベースの広帯域システム (広帯域サンプラー+VSREC) のシステムが活用できる。

1.6.4 必要なスペック

- **何が最も重要な特徴か？**

- **感度**

1 Jy ms 程度の天体であれば SKA のサブアレイで十分に検出可能である。

- **空間分解能**

1 秒程度の分解能があれば十分であり、SKA のサブアレイで可能。

- **視野**

Primary beam をすべて探査する必要あり

- **時間分解能**

ms 以下のダンプレートが必要

- **周波数帯**

L/S 帯あるいはそれ以下

- **SKA1 で可能か？SKA2 を待たなければならないか？**

SKA1 でも可能

1.6.5 SKA の必然性

- **他の装置での可能性？**

SKA が必須と考えられる。もし、ng-VLA にも SKA と同様な FRB サーチエンジンが乗るのであれば、ng-VLA でも可能となるが、現在その可能性は未定である。

1.6.6 準備研究案

- **既存の装置での準備研究の可能性**

VERA を用いて、S-band で commensal に FRB を探査する。感度的には不利だが、もし明るい FRB を一例でも VLBI で検出できれば、ダイレクトに位置決定が可能になり、大きなインパクトを与える。

1.6.7 将来計画への展望

VERA などの自前の装置で FRB を探査しつつ、すばるを用いたフォローアップ観測につなげることができれば、当該分野で一級の成果を挙げることが可能である。課題は、commensal なサーチエンジンの整備に必要な人員の確保と考えられる。

参考文献

Chatterjee et al. 2017

Lorimer et al. 2007

**** et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), ***

1.7 パルサー(廣田朋也)

1.7.1 背景(これまでの研究とその問題点や限界)

パルサーの観測的研究は、重力波の検出や重力理論の検証、銀河系力学的構造や磁場構造解明のツール、様々な種類のパルサーの発見やその物理的性質の研究など SKA の最重要テーマの1つとなっており、VLBI に直接関連する研究としても、パルサータイミングや位置天文観測が具体的に挙げられている。世界的に、パルサーの観測的研究は低周波数帯の電波望遠鏡を用いて発展しているが、これまでの水沢 VLBI 観測所をはじめとした日本国内の VLBI コミュニティでは低周波数での観測経験が不足している。パルサー研究分野をリードしていくためには科学的な検討や準備研究に加えて、新たな観測手段の整備も早急に始めることが必須と考えられる。以下の検討結果についても、パルサー研究の専門家も交えたより詳しい検証が必要である。

1.7.2 SKA で目指すサイエンス

- **概要、意義**

パルサーの高精度アストロメトリ観測。パルサータイミングによる重力波検出は SKA によるサイエンスで最重要課題とされている。パルサータイミングの計測において、VLBI 位置天文観測による距離や固有運動計測を行うことで、高精度化に貢献できると期待される。

- **何が新しいか？**

- **これまでの世界での研究、あるいは VLBI、水沢での研究との比較**

パルサーの観測的研究、特にパルサータイミングはオーストラリア、ヨーロッパなどでは精力的に進められているが、日本国内のコミュニティは世界に遅れをとっている。これは、国内に低周波数帯の電波望遠鏡、特に低周波数帯の電波干渉計や VLBI ネットワークがないためである。パルサー研究への参入に際しては、これまでの経験を生かした高精度アストロメトリを駆使したパルサー位置天文学による研究が重要であり、SKA でのパルサー研究者からもそのような貢献が期待されている。また、パルサータイミングでは、VLBI 観測同様にさまざまな要因の遅延較正が重要であり、VLBI による経験を生かすことも考えられる。

- **どう質的転換？**

世界的にはパルサータイミングや位置天文観測は精力的に進められている分野であるが、水沢 VLBI 観測所の研究としては全く新しい観測対象となる。既存のパルサー研究に対しても、SKA の高い感度は全く新しい種族の天体を発見する可能性が期待される。

- **どう量的転換(定量的に)？**

同上。ただし、既存の望遠鏡によるパルサー研究に対して、SKA では圧倒的

な感度で観測可能な天体数が増加する。

1.7.3 日本、水沢、VLBIなどの独自性・優位性

- **我々の現在の研究がどう発展できるか？**

パルサーの科学的な研究はこれまでほとんど行われてきていないため、新しい研究テーマとなる。一方で、パルサーを道具とした銀河系構造の研究では、VERAによるメーザー位置天文観測データとのシナジーが期待される。

- **我々の過去の経験や蓄積(位置天文やデータ較正、電波干渉計、VLBIなど)がどう生かされるか？**

位置天文観測の精度検証やデータ較正方法、データ解析の技術はほぼそのままSKAでのサイエンスにも生かされる。SKAで検討しなければならない点は、低周波数帯での電離層補正であるが、これは現在メタノールメーザーやOHメーザーの位置天文観測の検証という観点で国内のグループでも進行中である。

- **我々の先行研究や独自性は？**

メーザーによる位置天文観測の科学的成果やアストロメトリの観測技術はパルサー研究でも優位性がある。特に、SKA単体では不可能なVLBIによるパルサー位置天文観測は、SKAとのシナジーとして独自性がある。FASTなど大口径低周波数アンテナと組み合わせた高感度なEAVNを実現させることで、より直接的にSKAへと発展させることが可能である。

1.7.4 必要なスペック

- **何が最も重要な特徴か？**

- **感度**

必要な感度や観測天体数はSKAのSWGで議論が進められている。

- **空間分解能**

SKA1単体では位置天文観測には不十分。既存のアンテナを組み合わせたVLBIが必須。

- **視野**

広視野で複数天体の同時観測が可能であれば効率的になるが、科学的要求としては必須ではない？

- **時間分解能**

位置天文観測に必要な長期間のモニターは必須。高時間分解能(パルサーゲート)は短周期のパルサーの検出には不可欠。

- **周波数帯**

パルサーのSEDを考慮すると低周波数帯が有利。ただし、星間散乱などの影響も考慮して最適化する必要あり？

- **SKA1 で可能か？SKA2 を待たなければならないか？**

SKA 単体での位置天文ならば SKA2 を待つ必要あり。

1.7.5 SKA の必然性

- **他の装置での可能性？**

- **ALMA**

低周波数帯の観測がメインのため、ALMA は有力ではない。

- **VLBI(センチ波からサブミリ波)**

強い天体に限定する場合は低周波数帯(~L バンド付近?)の VLBI は可能。

- **ng-VLA**

ng-VLA の周波数帯による。低い周波数の SKA の方が有利か？

- **既存の南天の望遠鏡**

パルサーは南天に多く観測されているが、南天での観測が必須ではない。

- **その他**

1.7.6 準備研究案

- **既存の装置での準備研究の可能性**

- **VERA/KaVA/JVN/EAVN**

低周波数帯での大口径アンテナを含む VLBI ネットワークによるパルサー位置天文観測の経験を積むことは必須。

- **ALMA**

低周波数帯の観測がメインのため、ALMA は有力ではない。

- **既存の南天の望遠鏡**

パルサーは南天に多く観測されているが、南天での観測が必須ではない。

- **SKA precursors または SKA1(SKA2 から参入ならば)**

- **理論、他波長、その他**

水沢 VLBI 観測所、日本国内 VLBI コミュニティではパルサー研究の経験がほぼ皆無のため、理論、観測を問わず議論を深めることは必須。

1.7.7 将来計画への展望

- **SKA に参加をするならばどのような資源の整備が必要か？**

- **SKA に参加をするならばどのようなテーマの研究を始めるべきか？**

低周波数帯での大口径アンテナを含む VLBI ネットワークの構築、パルサー研究の基礎的理論・観測研究のフォロー、特にパルサー位置天文観測の経験が必要。VLBI の経験を生かすという点では、低周波数帯でのデータ校正の確立などで優位性が期待される。

1.8 SETI (廣田朋也)

1.8.1 背景(これまでの研究とその問題点や限界)

SKA の特筆すべき特徴の1つとしては、SETI(Search for Extraterrestrial Intelligence)が科学的なテーマとして取り上げられているということも挙げられる(Siemion et al. 2014)。SKA サイエンスブックによると、SKA-MID では地球上の高出力レーダー(航空監視や弾道ミサイル検知、Equivalent Isotropic Radiated Power $\sim 10^{17}$ erg s $^{-1}$)が 10 pc 以内であれば 15 分積分で、さらに強力なアレシボのレーダー(EIRP $\sim 10^{20}$ erg s $^{-1}$)ならば、4 ビームで 1 分観測すれば <100 pc の範囲にある全ての星で観測可能と推定している。また、星間空間での通信の傍受というテーマも挙げており、この中ではメーザーを用いた星間空間での通信も提案されている。もしこれが実際に行われているのであれば、commensal なメーザーサーベイを既存の VERA のアンテナでの観測、あるいは過去のアーカイブデータの見直しで検証可能とも言える。speculation ではあるが、例えば、時間変動するバースト(Orion KL, G353)、周期変動(メタノール)などのような観測からヒントを得るといいう可能性も否定はできないかもしれない。自然界の放射と区別して通信信号を検出するには、広時間分解能、高周波数分解能観測が必要であり、高い空間分解能での VLBI 観測もこのような探査には有利と思われる。また、もしこれが本当ならば、メーザーの観測対象は文明が進化するまでの時間を十分経ていない星形成領域よりは、晩期型星周囲にある惑星の方が可能性が高いと期待される。さらに、惑星間通信を傍受するのであれば、複数の地球型惑星がある系を対象にしなければならず、そのような探査が別途必須である。一方、このような研究が、本当に科学的と言えるのか、水沢 VLBI 観測所の科学研究の柱として推進できるのかどうかは大きな議論となるであろう。もし SETI を将来の科学研究として進めるのであれば、例えばアストロバイオロジーセンターと連携して、地球型惑星の探査なども含め新たな枠組みで行うことも考えなければならない。

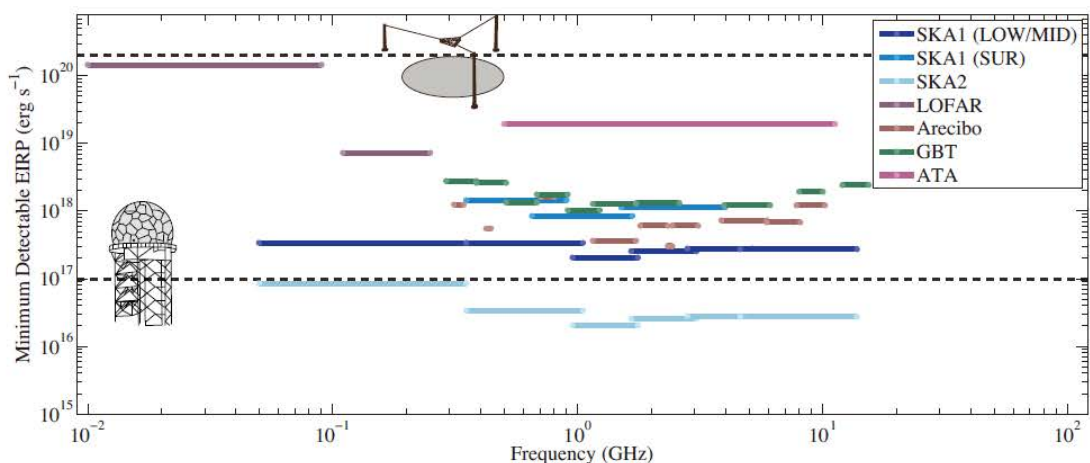


図 1.8.1. SETI で検出が予想される人工電波源の検出感度。15 pc 以内の空港レーダーと惑星間通信レーダーに対応する EIRP(Equivalent Isotropically Radiated Power)を示してある。Siemion et al. (2014)より。

*Third Decennial US-USSR Conference on SETI
ASP Conference Series, Vol. 47, 1993
G. Seth Shostak (ed.)*

ASTROPHYSICAL MASERS AS AMPLIFIERS OF ETI SIGNALS

JAMES M. CORDES

Astronomy Department, Cornell University, Ithaca, New York 14853

ABSTRACT Interstellar and circumstellar masers are natural amplifiers of high gain, so long as they are not saturated. It is shown that weak ETI sources, otherwise detectable at only parsec distances, may be rendered detectable across the Galaxy if viewed through a maser. A precedent for such amplification is the occurrence of bursts by H₂O masers when individual maser filaments are aligned. From recent work on variability, angular diameters, and maser theory, we derive the necessary conditions for the efficacious use of masers by ETI and we estimate the volume that is illuminated with amplified radiation from a single maser region. These considerations imply that SETI in the directions of known interstellar masers (especially OH at 1.67 GHz and methanol at 6.6 GHz) and perhaps in most of the galactic plane should be undertaken.

図 1.8.2. メーザーによる SETI の可能性を議論した論文。Cordes (1993) より。

1.8.2 SKA で目指すサイエンス

- **概要、意義**

地球外文明からの電波の検出、高空間分解能での位置決定。科学的な研究として進めることが可能になれば、天文学、宇宙生物学という分野にとどまらない極めてインパクトの高い研究となることは疑いの余地はない。

- **何が新しいか？**

- **これまでの世界での研究、あるいは VLBI、水沢での研究との比較**

SETI 科学的に行う、というのはそれ自体が全く新しい試みであり、これまでの日本の天文学研究からは大きな転換となる。

- **どう質的転換？**

SETI はこれまでの天文学的では科学として認められないことが多く、実現されれば質的な転換となることは疑いの余地はない。

- **どう量的転換(定量的に)？**

量的にはゼロからの発展となる。既存の望遠鏡での感度では検出可能性はほぼゼロであったが、SKA では高感度、広視野によって初めて意味のあるサーベイが可能となる。

1.8.3 日本、水沢、VLBIなどの独自性・優位性

- **我々の現在の研究がどう発展できるか？**

ここで紹介した研究は、過去の経験は電波干渉計を用いる、という点以外ほとんど連続性はないが、データ解析方法などについて経験を生かせる可能性はある。

- **我々の過去の経験や蓄積(位置天文やデータ較正、電波干渉計、VLBI など)がどう生かされるか？**

電波干渉計のデータ解析、位置天文観測の手法などが SETI でも実用化されれば、これまでの研究の経験が生かされると期待される。

- **我々の先行研究や独自性は？**

SETI の先行研究を行うことは今のところ現実的ではなく、独自性を発揮するのも難しい。ただし、SETI でもレーザーを信号として検出を目指すのであれば、これまでの VERA のアーカイブデータでの検証は可能かもしれない。

1.8.4 必要なスペック

- **何が最も重要な特徴か？**

- **感度**

相手の放射強度や距離が不明なため、地球上の放射から推定する必要がある。対象天体を増やすためには性能向上は不可欠。

- **空間分解能**

太陽系近傍の星(<100 pc)ならば、1au スケールの位置同定は 10mas の位置決定精度で十分。S/N が高ければ SKA1 単体でも十分。

- **視野**

対象天体が特定の惑星系などに制限できない場合は、commensal な観測、あるいは広視野で無バイアスにしなければならない。あるいは、Kepler 望遠鏡のように、特定の領域に絞った観測を行う可能性もありうる。

- **時間分解能**

相手の通信の信号で想定される時間分解能が必要であり、予想不可能。

- **周波数帯**

レーザー観測を行うならば、Lバンド、Cバンドは必須、可能ならば Kバンドまで拡張する必要がある。

- **SKA1 で可能か？SKA2 を待たなければならないか？**

感度重視ならば SKA2 を待つ必要あり。

1.8.5 SKA の必然性

- **他の装置での可能性？**

研究の性質上、他の観測装置、特に共同利用装置を用いて観測時間を確保することは極めて困難と考えられる。

1.8.6 準備研究案

- **既存の装置での準備研究の可能性**

研究の性質上、他の観測装置、特に共同利用装置を用いて観測時間を確保することは極めて困難と考えられる。

1.8.7 将来計画への展望

- **SKAに参加をするならばどのような資源の整備が必要か？**

- **SKAに参加をするならばどのようなテーマの研究を始めるべきか？**

SETIを行う上で最も重要な点は、SETIが科学的な研究になりうる、という点をコミュニティや社会に理解してもらうことにある。現時点では、これは極めて困難と考えられる。

参考文献

Cordes 1993, in Third Decennial US-USSR Conference on SETI, ASPC 47, 257

Siemion et al. 2014, Proc. Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA14), 116

Appendix 2. SKA 以外に競合する、あるいは共同研究が期待される大型計画

2.1. EAVN とその拡張

East Asia VLBI Network (EAVN)はその名の通り、東アジア地域の国際連携 VLBI 網である。現在は VERA と KVN を組み合わせた KaVA が主力であるが、これに国内大学連携 JVN や上海の 65 m アンテナをはじめとした中国のネットワーク CVN を組み合わせたアレイを構築し、主に C, X, K, Q バンドでの定常的な VLBI 観測を目指している。また、野辺山 45m 望遠鏡をはじめとしたその他の電波望遠鏡、オーストラリアやイタリアなど東アジア地域以外との連携、建設計画が始まったばかりのタイ VLBI Network (TVN)を組み合わせた拡張アレイへの発展も検討され、試験的な VLBI 観測も行われている。これらのアレイでは、組み合わせによっては VLBA/HSA や EVN と同等かそれをしのぐ高感度、高分解能を達成できるモードもある。さらに、現在中国で建設が進む FAST を組み合わせることにより、SKA1 とほぼ同じ開口面積のアレイとなることも現実的となっている。ただし、FAST では、初期は低周波数(<3 GHz)に観測が限定される。日本国内だけでなく東アジア地域でも共通周波数帯の電波望遠鏡は少なく、SKA1 の前に高感度な EAVN 観測網を実現するためには、FAST の相手局となる低周波望遠鏡の開発や転用が必須である。

FAST がなくても表 2.1 に挙げた分解能や感度での観測は可能であり、これによりイメージ感度については SKA1-MID (0.93 uJy/beam, 1hr 積分)の約 4%の感度 (6.7GHz の場合)での試験観測や先行(準備)研究が可能である (6hr 積分すれば 10%到達可能である)。特に、VLBI という観点で SKA2 に先んじて 1-2mas 前後での高空間分解能観測が可能となる意義は大きい。

表 2.1 EAVN(日韓中)のアレイスペック(暫定)

周波数	観測局	空間分解能	(1hr)イメージ雑音(※)
6.7GHz	VERA, 蔚山, 日立, 高萩, 鹿島, 山口, 白田, 天馬, 昆明	2.4 mas (小笠原-昆明)	23 uJy/beam
22GHz	VERA, KVN, 日立, 高萩, 鹿島, 岐阜, 世宗, 天馬, ウルムチ	0.6 mas (小笠原-ウルムチ)	75 uJy/beam
43GHz	VERA, KVN, 天馬, 野辺山, 世宗	0.7 mas (小笠原-天馬)	120 uJy/beam

※ 帯域 512MHz (2Gbps, 2bit)、natural weight を仮定。各局のスペック(開口能率, T_{sys})はまだ完全には確定していない(または公称値不明)部分もあり、暫定値を用いている部分もある。

2.2. ALMA, サブミリ波 VLBI

ALMA は 2012 年から共同利用を開始し、近い将来に当初仕様の全モードを実現したフルアレイの完成が計画されている。ALMA は今後 20-30 年ほど運用が続くと期待され、SKA が完成した際には同じ天域で異なる周波数帯というシナジーが期待される。さらに、ALMA でも新たな開発項目や将来計画が検討されている。SKA と直接関わる可能性があるのは、40 GHz 帯の band 1、2016

年のサイクル 4 から共同利用が始まるミリ波・サブミリ波 VLBI モード(phased array)がある。また、将来計画として、ALMA に 200 km 基線の南米のアレイを追加した extended ALMA や、同様の南米の Large Latin American Millimeter Array (LLAMA)計画も検討が進んでいる。星間物質、アストロメトリ、恒星物理学、AGN 研究など、現在の VERA や VLBI、SKA でも計画されているサイエンスでカバーできる範囲は大きく、これらの動向にも注意が必要である(Asada et al. 2017 参照)。

2.3. ng-VLA

北米では、将来計画として North American Array (NAA)構想から発展した new generation VLA(ng-VLA)についての議論が進められている。ng-VLA は、一言で言えば「VLA の感度で VLBA の分解能を達成する」装置であり、3mm-3cm(1-115 GHz)で JVLA、ALMA の 10 倍の集光力を達成することを目指している。300 km 基線でもミリ秒角オーダーの分解能が達成可能である。ng-VLA は ALMA と SKA1 のギャップを埋めるような装置であり、SKA-H の構想にもつながるものである。サイエンスの議論は始まったばかりのようであるが、観測周波数帯は既存の国内 VLBI ネットワークとほぼ完全に重複し、SKA に比べると科学的テーマの直接的なつながりは強いといえる。一方で、ng-VLA はこれまでのサイエンスとの関連性が強く、SKA のような全く新しいサイエンスへの発展、という観点では検討がさらに必要と考えられる。また、NAA のもう1つのデメリットは、ALMA とのシナジーが取りにくい北天に作られるという点がある。観測装置の性能は、計画段階ということもあって日々更新されているようであり、今後も注視が必要である。

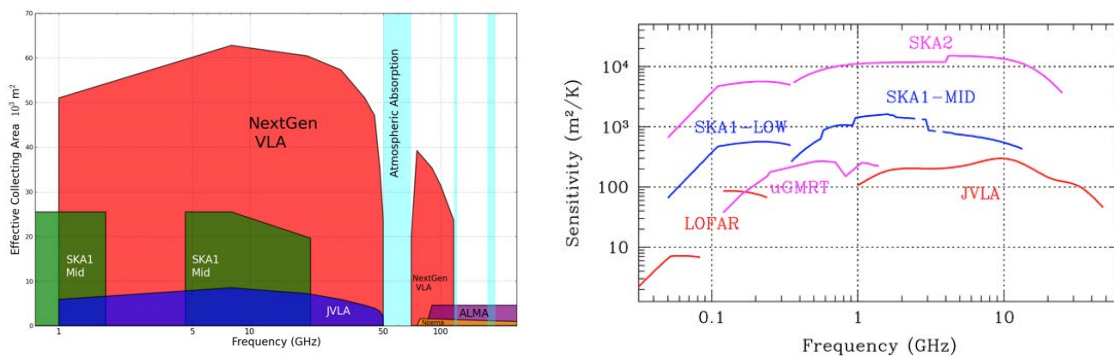


図 2.1. ng-VLA、SKA、ALMA などの感度と周波数帯の比較。左は ng-VLA のウェブサイト、右は SKA Community Briefing(2017 Jan 18)の資料より。SKA2 が SKA1 に対して 10 倍の感度を達成するため、10 GHz 帯付近までは ng-VLA の 3 倍程度の感度となる。

参考文献

JVN: <http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/jvn/>
 EAVN: <http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/eavn/>
 ng-VLA: <https://science.nrao.edu/futures/ngvla>
 Sub-mm VLBI: Asada et al. 2017, arXiv:170504776

Appendix 3. Mizusawa SKA Science WG 活動記録

3.1. メンバー

氏名	所属	主な専門分野	注
廣田朋也	国立天文台	星惑星・星間物質、VLBI/ALMA 他	代表
元木業人	国立天文台→山口大学	星形成、干渉計全般	
坂井伸行	国立天文台	銀河系、位置天文、VLBI/BESSEL	
秦和弘	国立天文台	AGN、VLBI/EAVN	
新沼浩太郎	山口大学	トランジェント、VLBI/JVN	
本間希樹	国立天文台	FRB、VLBI/sub-mm VLBI	

3.2. 履歴

2014 年度	所内シンポジウム内容
2014 10/21	将来計画全般の議論
12/18	SKA のサイエンス検討
2015 04/07	SKA 最新ステータスのレビュー (鹿児島大：赤堀)
2015 年度	MSS 内容
2015 05/18	MSS 概要と方針議論
06/08	SKA アストロメトリ (鹿児島大：今井) 所内シンポジウムのレビュー (廣田)
06/26	SKA パルサータイミングのレビュー1 (熊本大：高橋)
07/16	SKA VLBI のレビュー (坂井)
08/04	SKA パルサータイミング 2 (熊本大：高橋) Cradle of life のレビュー (廣田)
08/10	星形成のレビュー (元木)
08/26	AGN のレビュー (秦)
09/07	SKA キーサイエンス WS の紹介 (熊本大：高橋) SKA パルサータイミングのレビュー3 (熊本大：高橋) North American Array の紹介 (廣田)
09/25	VERA ユーザーズミーティングで報告 (廣田)
10/06	ngVLA の紹介 (廣田)
10/29	SKA パルサータイミングのレビュー4 (熊本大：高橋)

11/13	トランジェントのレビュー（新沼）
11/25	中間の議論、今後の方針
12/16	Cradle of life のレビュー（廣田）
2016 01/08	SKA パルサータイミングのレビュー5（熊本大：高橋）
01/25	星形成研究の提案（元木）
02/03	銀河系天文学の提案（坂井）
02/10	系外惑星、SETI のレビュー（廣田）
03/01	トランジェントのレビュー（新沼）
03/18	SKA-JP シンポジウム 2016 で報告（廣田）
03/25	FRB のレビュー（本間） SMBH のレビュー（秦）
03/30	まとめの議論
2016 年度	MSS 内容
2016 04/22	今後の方針の議論
05/16	レポートフォーマットの提示と議論
06/29	レポート途中経過の確認、話題提供など
07/26	レポート途中経過の確認、話題提供など
08/12	レポート途中経過の確認、話題提供など
08/24	レポート途中経過の確認、話題提供など
10/04	VERA ユーザーズミーティングで報告（廣田）
11/15	レポート途中経過の確認、話題提供など
12/05	レポート途中経過の確認、話題提供など
12/28	VLBI 懇談会シンポジウムで報告（廣田）
2017 01/25	レポート途中経過の確認、話題提供など
03/08	レポート途中経過の確認、話題提供など
2017 年度	MSS 内容
04/24	レポート途中経過の確認、話題提供など
05/10	レポート途中経過の確認、話題提供など
05/17-18	レポート執筆と議論（水沢・三鷹・野辺山でスカイプ・f2f 併用）
06/02	レポート第 0 版の議論
06/15	レポート改訂版の議論
07/24	まとめの議論
09/01	VLBI 小委員会での発表（予定）