

銀河班 中間報告

2020年9月23日

VLBI将来計画WG 中間まとめ報告会

秦和弘/永山匠（銀河班世話人、NAOJ水沢）

- メンバー

- 永山匠（水沢, 世話人）、秦和弘（水沢, 世話人）、紀基樹（工学院）、酒井大輔（水沢）、坂井伸行（KASI）、土居明弘（宇宙研）、永井洋（三鷹）、新沼浩太郎（山口）

- 2020年4月～9月の間に計 9 回のミーティング

- 重要サイエンスは何か？
- 必要な望遠鏡は？技術・開発項目は？
- タイムラインは？

- 分野の背景（general, 日本VLBIのこれまで）
- 今後目指すべき重要サイエンス案
- VERA 86GHz検討（大気、アストロメトリ精度、イメージング）
- サイエンス-必要性能/開発まとめ表、タイムライン(非常にラフ)
- まだ検討の余地がある議題

背景

- 銀河は宇宙を構成する最も重要な天体の1つであり、我々も天の川銀河の中に住んでいる
- 銀河はいかにして形成されるのか？
- 天の川銀河の構造は？基本パラメータは？
- SgrA*の正体、周辺領域の構造は？
- SMBHパラダイムは本当か？いかにして形成されたのか？
- AGN/SMBHの活動性（質量降着・放出）や、多様性を支配する基本パラメータは何か？
- 銀河とBHの共進化、宇宙論的進化は？

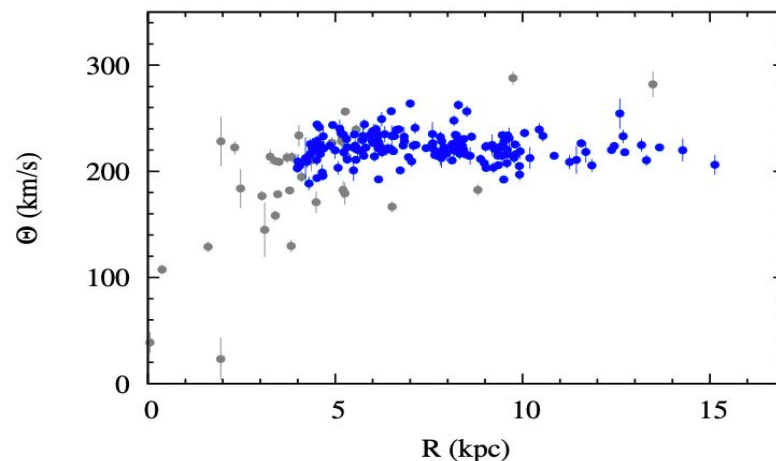
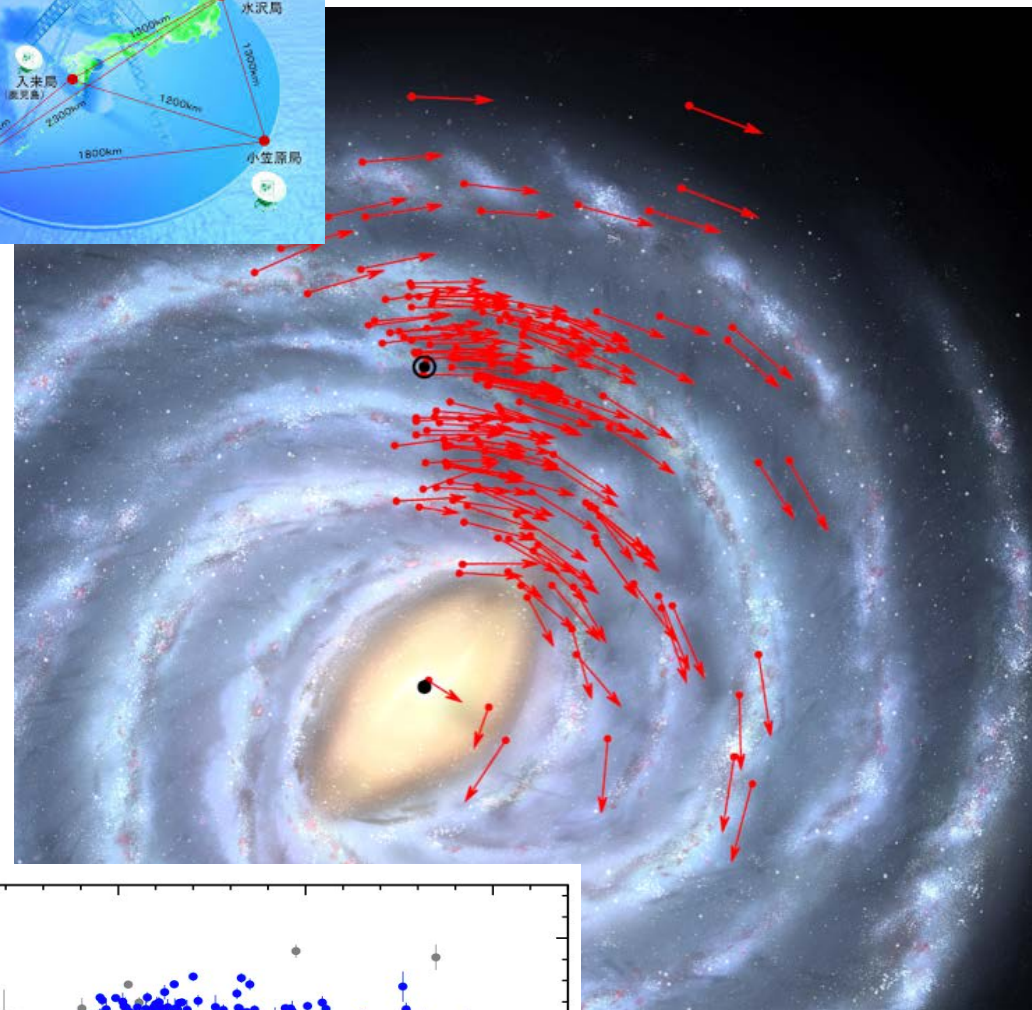
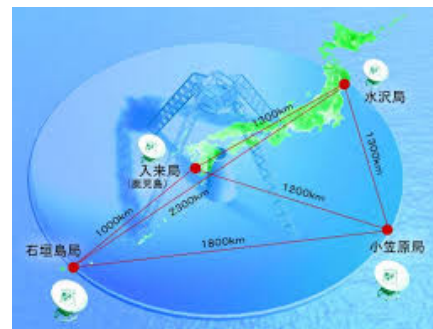


VLBIは圧倒的な高解像度、高位置精度を武器に銀河にまつわる根源的問いに取り組んできた

天の川銀河の精密測量

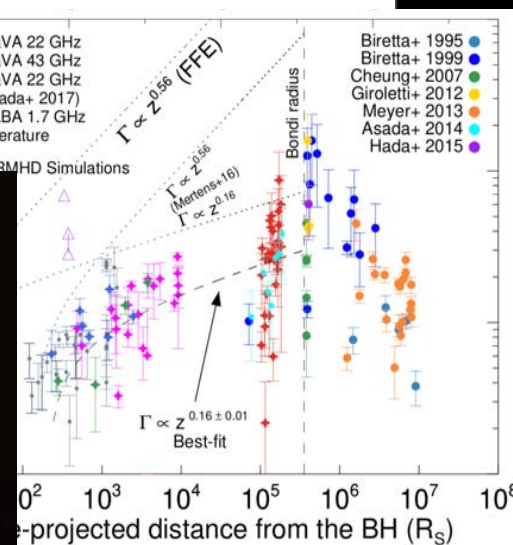
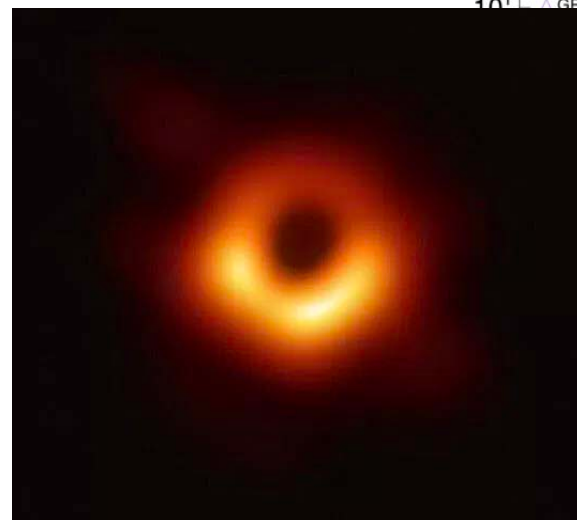
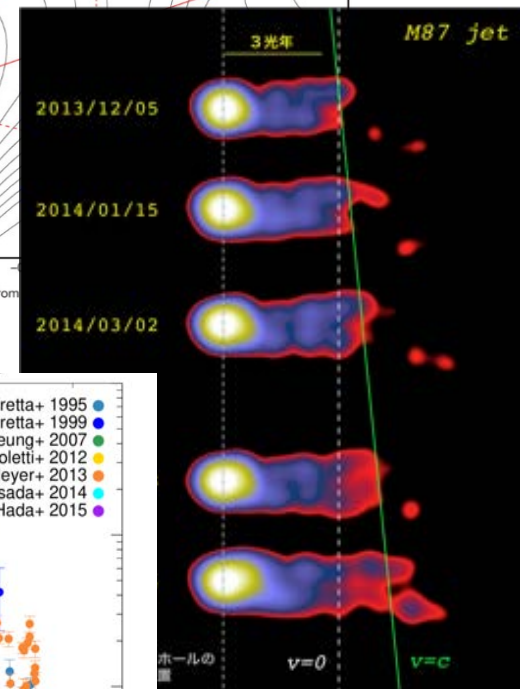
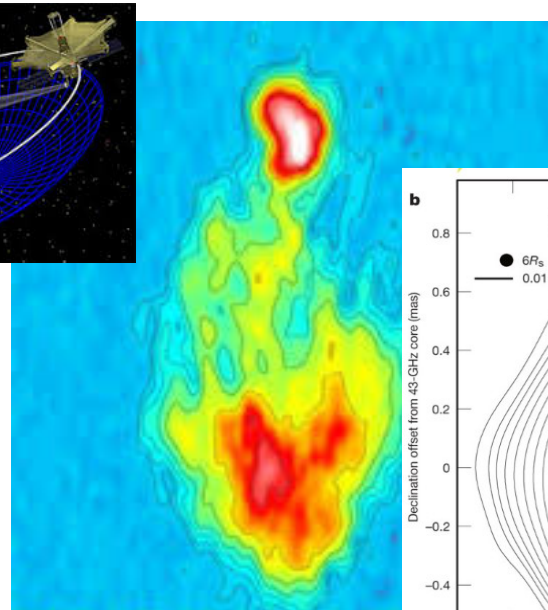
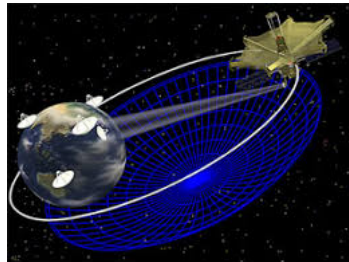
- VERA 2beamアストロメトリ
- VERA: 99天体 (VERA+VLBA: 224天体)
- 銀河定数の導出
 - $R_0 = 7.92 \pm 0.16$ (kpc)
 - $\Omega_0 = 28.63 \pm 0.26$ (km/s/kpc)
- 回転曲線、ダークマター分布
- 渦状腕構造と密度波理論の検証

VERA Collaboration+ 2020



活動銀河核 SMBH周辺構造

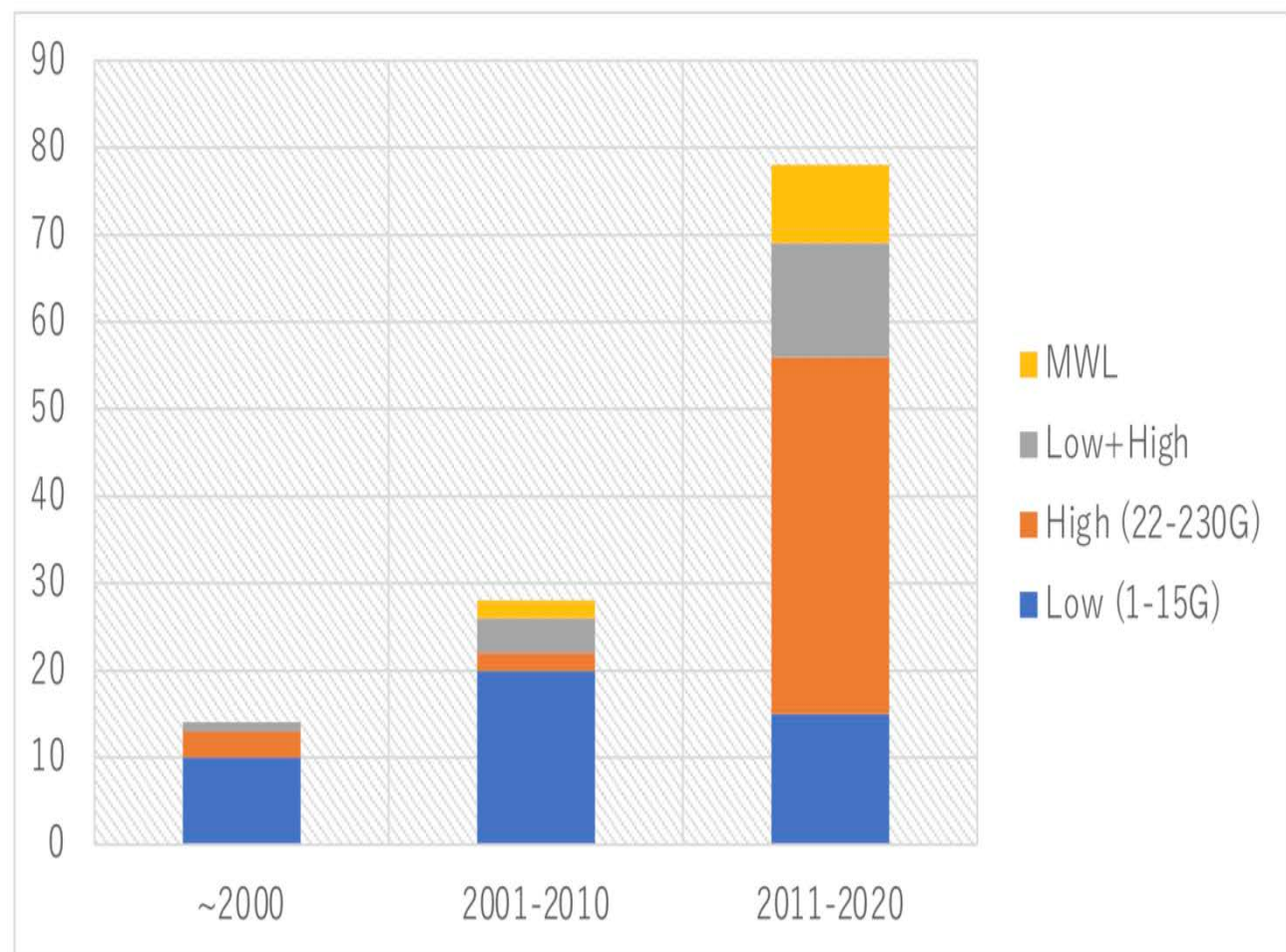
- VSOP/スペースVLBI
- VERA/JVN/EAVN/VLBAを用いた
ジェット生成・加速・収束・ガンマ
線領域など
- EHT：多方面での主要貢献
 - JCMT/ALMA運用
 - イメージングソフト
 - EAVN含む多波長サイエンス
 - 理論・シミュレーション
 - (スペース)



(参考) 論文統計

- これまでのコミュニティの研究歴史や、今後のサイエンスの潮流・方向性を見定める1つの材料
- 右図は日本VLBIコミュニティのAGN関連論文（理論、手法等含）
- 年代別、装置別、周波数別、トピック別、天体種族別などで統計
- 銀河アストロメトリでも同様の統計調査中

例：日本のAGN/VLBI論文統計
年代別出版数の推移と周波数帯



次なるサイエンスゴールを議論するにあたり出た様々な意見

- 分野のトップサイエンス、挑戦的、天文学/科学全般にインパクト
- VLBI/日本が独自性を発揮
- これまでの経験・技術・研究の蓄積を活かす
- ミリ波VLBI技術の躍進（更に高位置精度、高解像度撮影）
- 自前の望遠鏡を活かしたサイエンスは必ず必要
 - 自前(既存)装置を最大限活かすことが、将来的な大目標達成につながる
- 多波長/分野横断的視点（VLBIに凝り固まっても良くない）
 - EHT, SKA, ngVLA, TMT, ALMA, CTA, XRISM, KAGRA, IceCube etc
 - 天文学全体が共有する根源的問い、他望遠鏡や理論と連携可能なサイエンス
- 水沢将来計画(SK A)とのつながり
- 宇宙研 気球/スペースVLBIとのつながり
- etc...

今後目指す重要サイエンス案

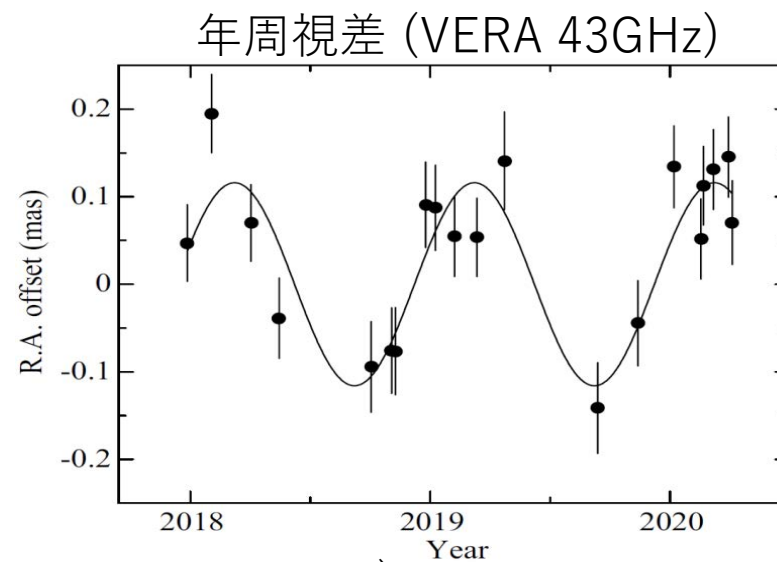
- 1. 天の川銀河中心アストロメトリ
- 2. SMBHホライズンスケール探査
- (3. TBD 低周波/波長横断的サイエンス?)

テーマ 1: Sgr A* アstrometry

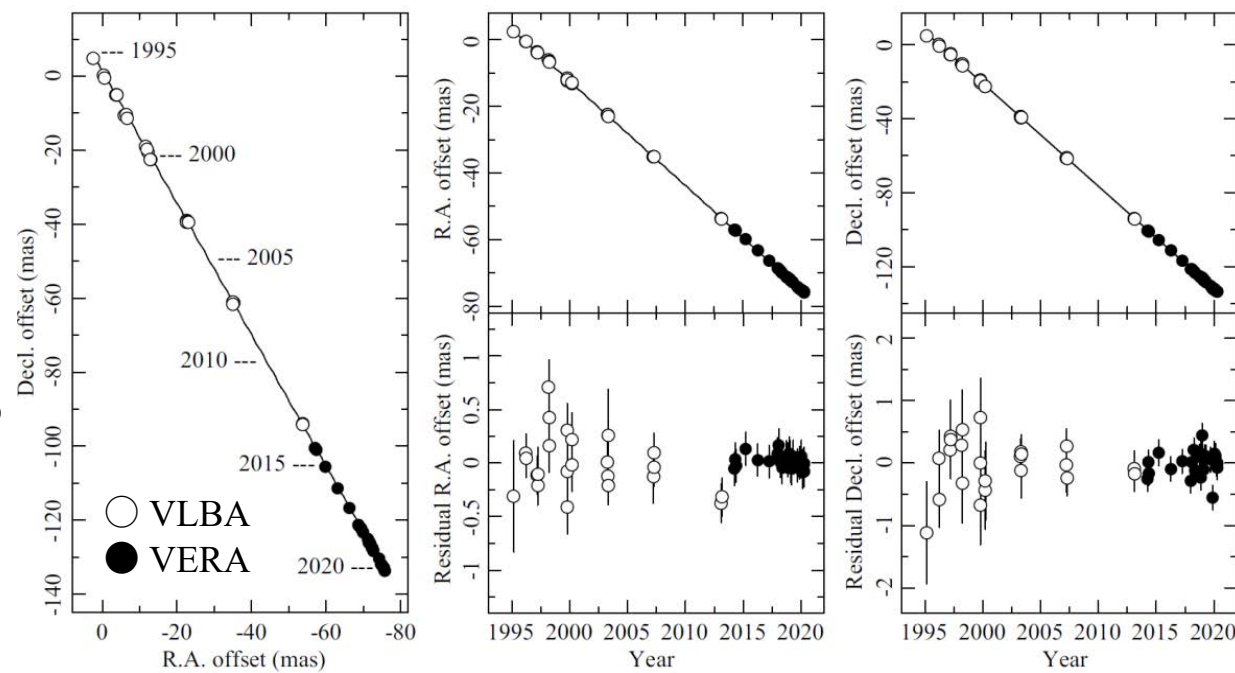
- 銀河定数 R_0 , Ω_0 のダイレクトな測定
- 現状: $8.5^{+1.5}_{-1.1}$ kpc (0.117 ± 0.017 mas) (15%)
 - $7.92 \pm 0.16_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{sys}}$ (4%) VLBI 189 src (VERA+ 2020)
 - 8.15 ± 0.15 (2%) VLBI 147 src (Reid+ 2019)
 - $8.178 \pm 0.013_{\text{stat}} \pm 0.022_{\text{sys}}$ (0.3%) Geometric distance (Gravity+2019)
 - $7.971 \pm 0.059_{\text{stat}} \pm 0.032_{\text{sys}}$ (0.7%) Geometric distance (Do+ 2019)
 - 未だ 0.2 kpc (3%) の系統的なズレがある。

- これらと比較するには最低3%が必要
- VERA 43GHz で今後2年間継続 (独壇場)

- 86GHz は Diffractive scattering の影響が少ないので検出できる基線長が2倍伸びる
- EAVN 86GHz が重要

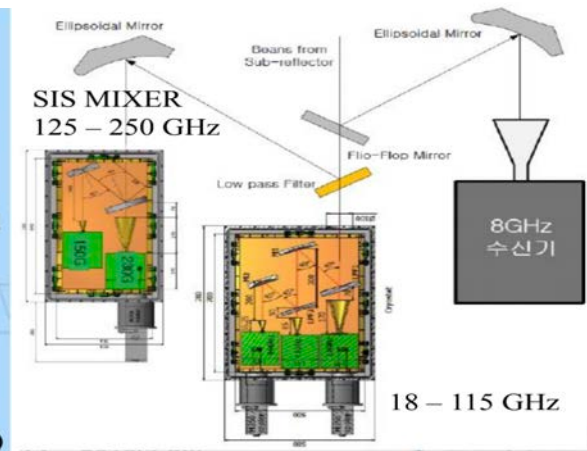
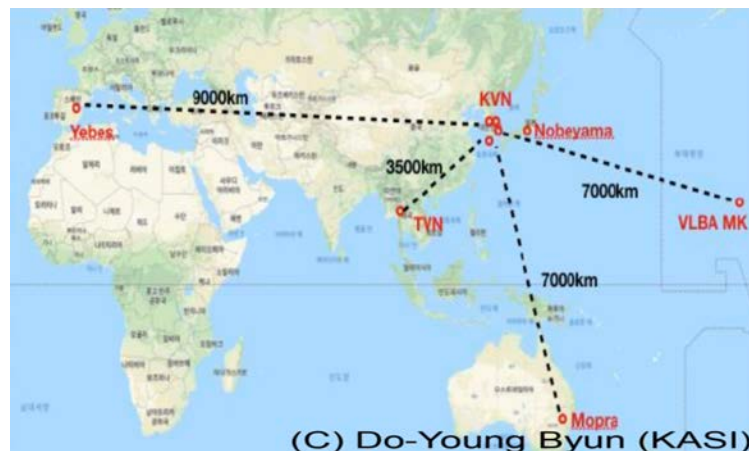
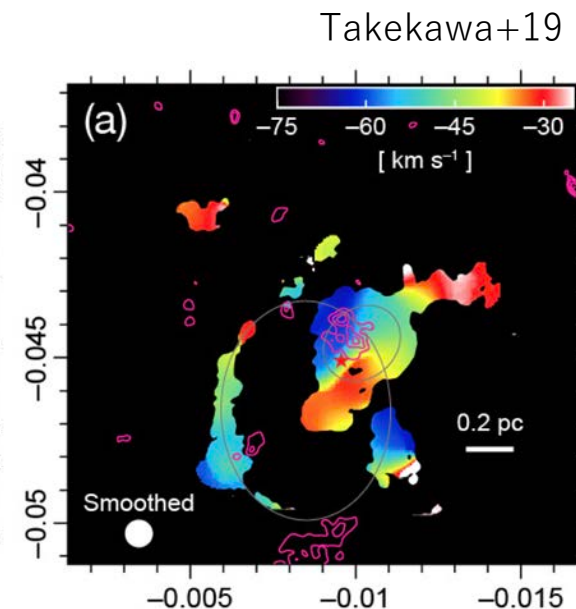
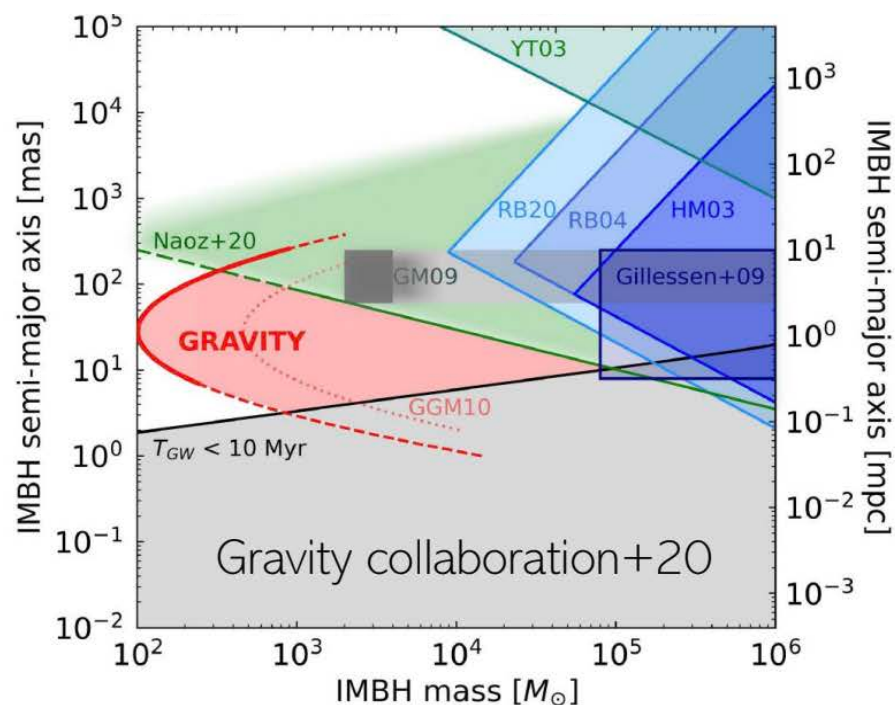


固有運動 (VLBA+VERA 43GHz)



テーマ 1: Sgr A*アストロメトリ

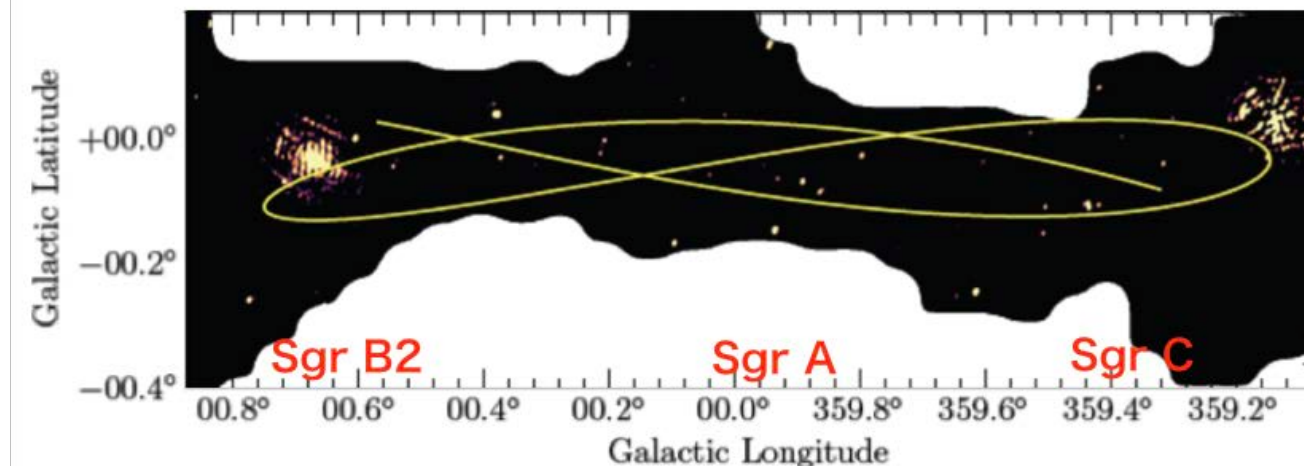
- SMBH形成のカギになるIMBHの探査は近年ますます重要テーマ
 - 重力波、GRAVITY(近赤)、ALMA、VLBI、X線
- SgrAアストロメトリをミリ波(86/130G)かつ超基線(KVN→EAVN)でさらに高精度化することで、SgrA周辺の"dark mass"に制限
 - 10^3 - $10^4 M_{\text{sun}}$ のIMBHの有無まで制限可能?



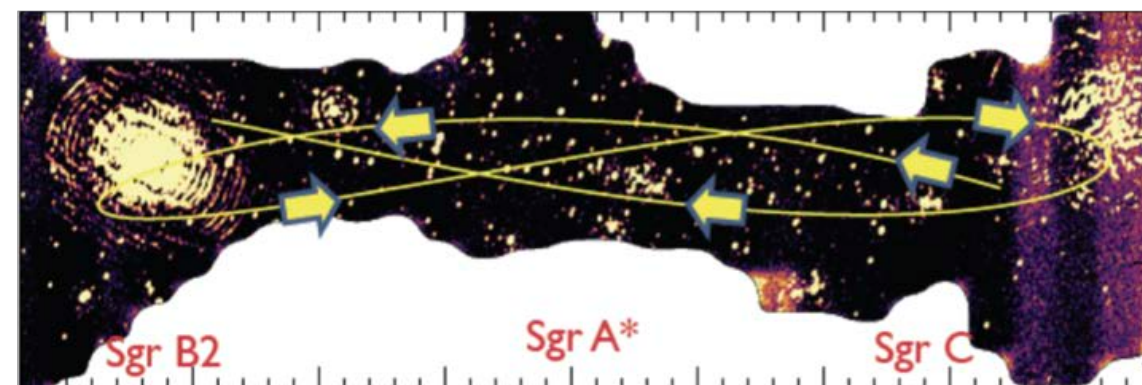
テーマ 1: Sgr A* 「周辺」 アストロメトリ

- CMZアストロメトリの拡張
3次元速度測定
- SMBH/Sgr A*への質量供給
メカニズムの解明
- 分子雲衝突による角運動量消失
や星形成のトリガー
- 主に22GHz水メーザーが対象
- 大口径望遠鏡による感度の向上が重要

VERA/KaVAでの検出可能22GHz水メーザー(>1 Jy)



一桁感度が上がった時に検出可能な水メーザー(>0.1 Jy)

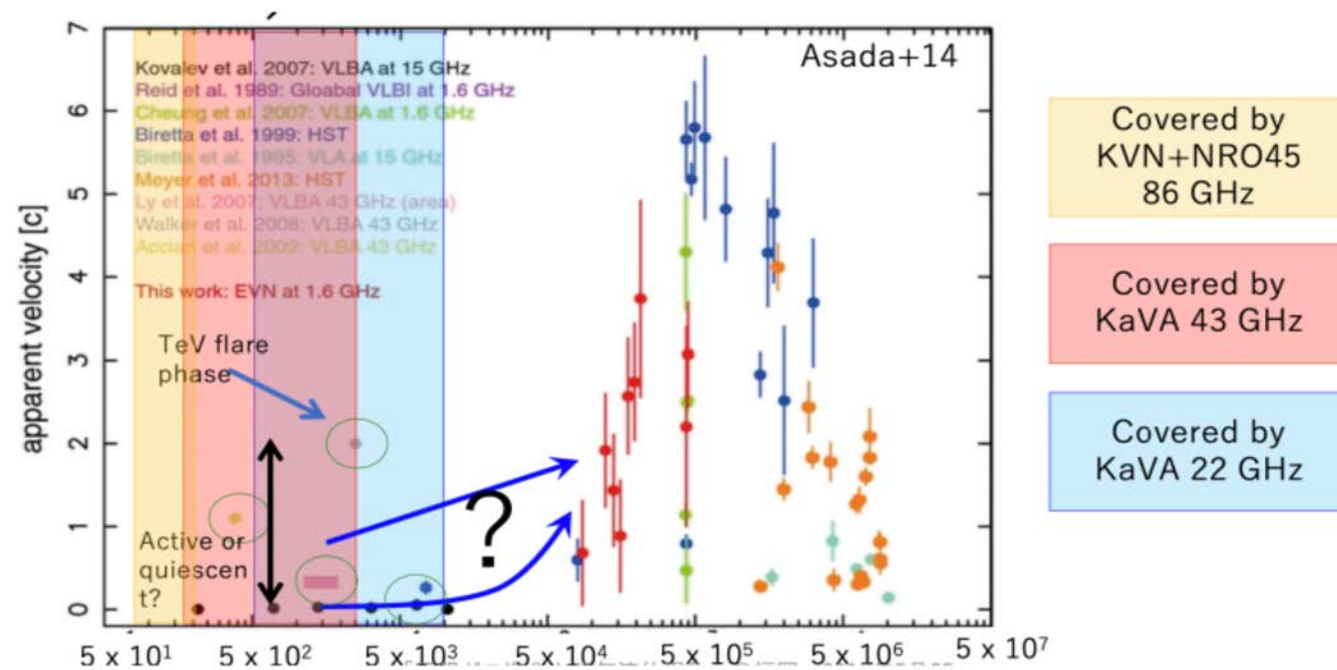
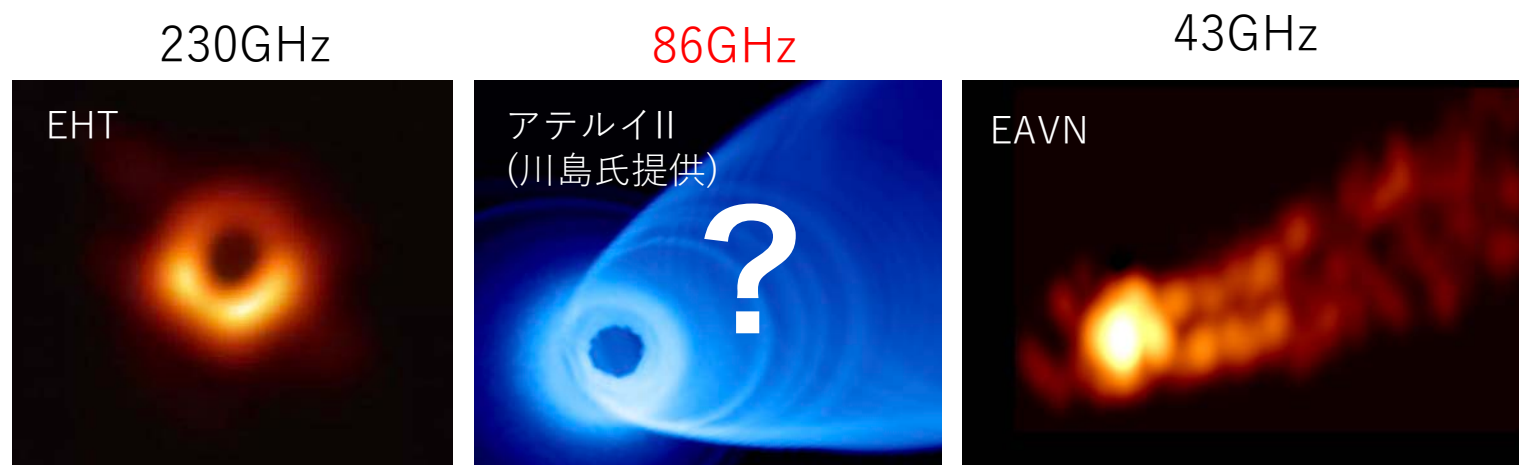


SWAG survey with ATCA

- 意義・インパクト
 - 銀河系の最も基本的な重要パラメータを最も直接的かつ高精度で決定
 - IMBHの謎、SMBH質量供給・形成理論解明に手がかり
- 新規性
 - ミリ波(>43GHz)のアストロメトリ（固有運動/年周視差）は未開の領域
- 日本の独自性・優位性
 - VERA 22/43GHzアストロメトリの実績
 - 86(130)GHz: 日本はEAVNにおける長基線を実現
- 必要な性能・開発項目
 - 位置精度: 50 μ as（視差精度4 μ as, 3%相当）
 - VERA 86GHz(130GHz)化（できれば多周波同時受信）
 - アレイ広帯域化 (>8-32Gbps)

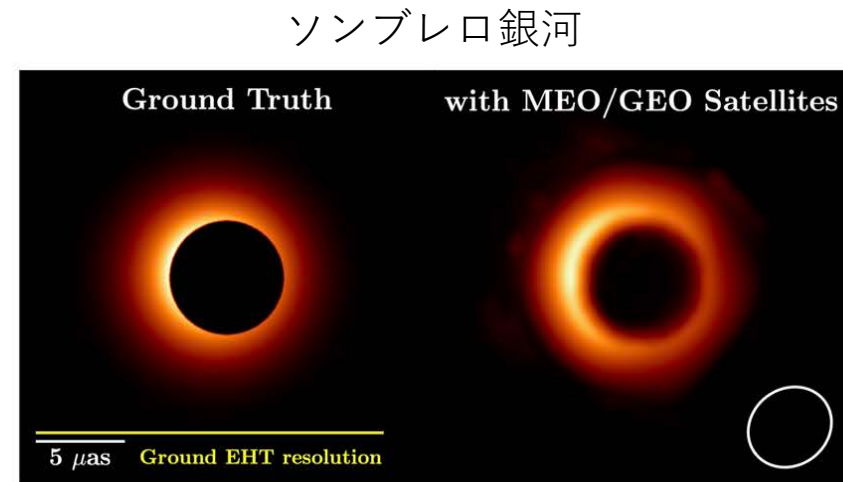
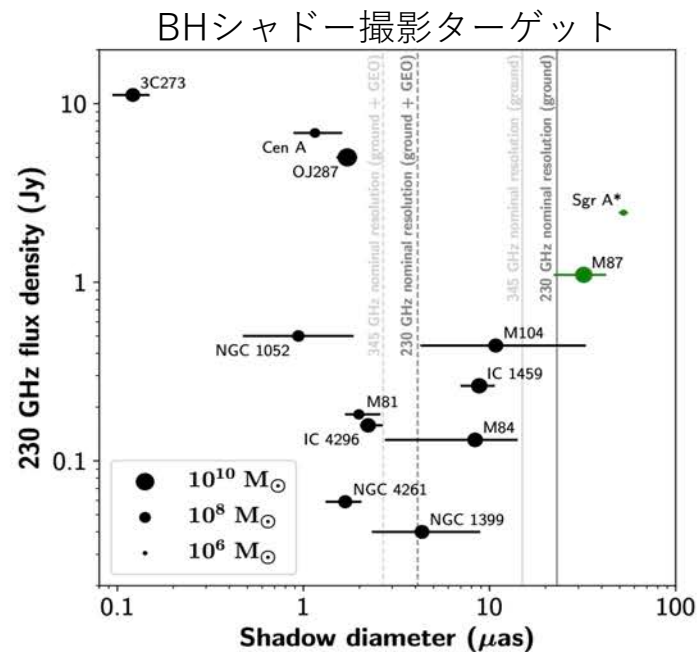
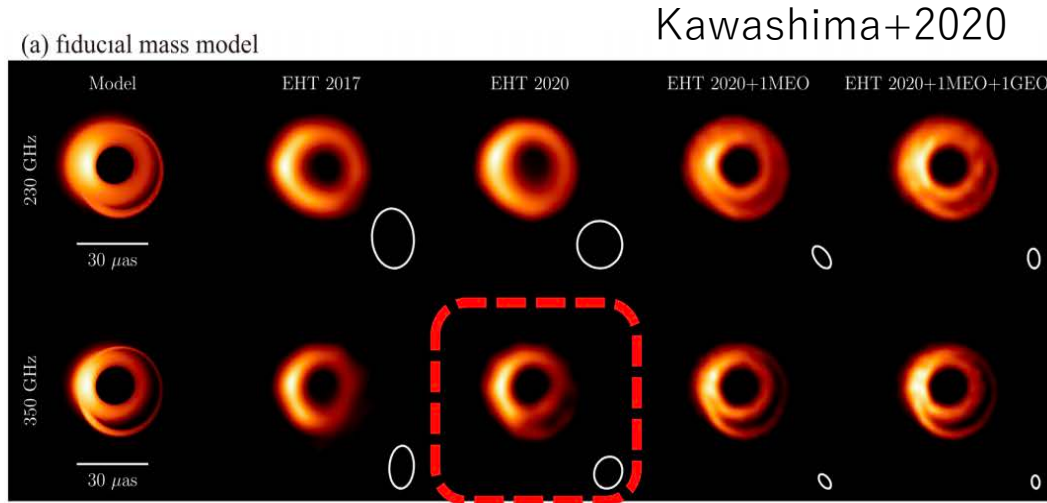
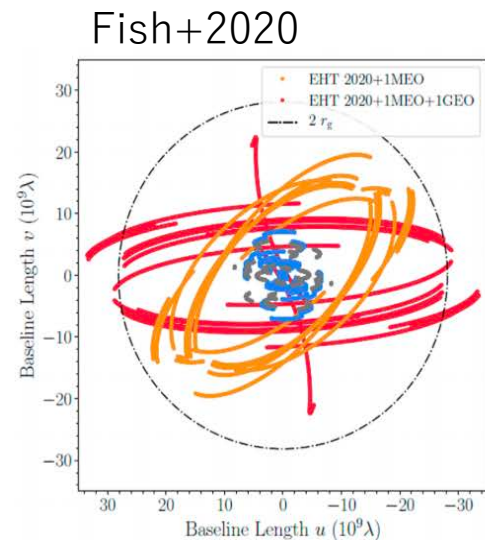
テーマ 2 : SMBH直接探査 (短~中期)

- EHT初期成果の宿題：シャドーとジェットのコネクション
 - BHからのエネルギーの引抜き
 - 磁力線の形状と強さ
- BHから ~ 10 - $300R_s$ 領域のジェット初期形状・速度分布の決定が重要
 - 86GHzがカギ
- 詳細形状はGMVA+ALMAで取組む
- 速度・加速度は86GHzで高頻度モニターできるアレイが必要
- → EAVN 86GHz
(KVN+NRO+JCMT+GLT+VERA)



テーマ 2 : SMBH直接探査 (長期)

- 230/350GHzスペース
- 解像度 $<10\ \mu\text{as}$
- 光子リングの微細構造
 - BHスピン制限
 - ホライズン磁場構造
- シャドーの統計的研究へ
 - 近傍LLAGN
 - SMBH多様性



Doeleman+2019 (Astro2020 WP)

- 意義・インパクト
 - 画像に基づく強重力場中の一般相対論検証 → 天文学から基礎物理理論を検証
 - BHからのエネルギーの抽出機構 → 天体物理学における最大の謎の解明
 - SMBHの多様性を明らかにする → 宇宙・銀河進化の歴史
- 新規性
 - VERA/EAVN 86G: 「ミリ波VLBIで高頻度」という新たなパラメータスペース
 - 230/350GHzスペース: 「ミリ波でスペース」という前人未到領域
- 日本の独自性・優位性
 - M87/SgrA, AGNジェットなどSMBH観測・理論研究の蓄積、理論/観測連携
 - スペースVLBIの経験・蓄積
 - 野辺山45mというミリ波大口径望遠鏡
 - XRISM/CTAサイエンスとの強い親和性
- 必要な性能・開発
 - VERA 86GHz化（できれば多周波同時受信, かつ両偏波受信）
 - ミリ波スペースVLBI技術全般

VERA 86Gに関する検討

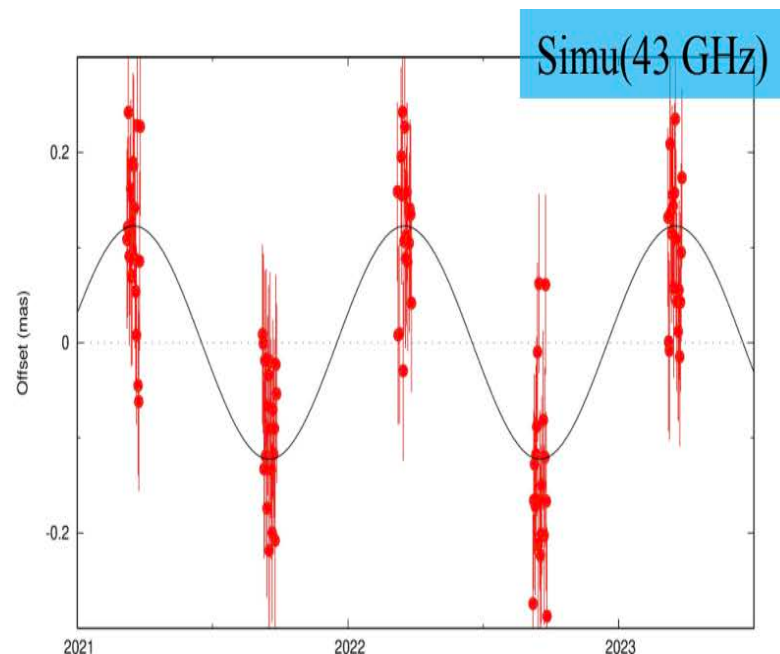
- SgrA アストロメトリ精度
- M87 イメージングシミュレーション
- 大気（そもそもVERAで86Gは可能か？）

SgrA 43/86G アstrometry 最適な観測期間と頻度の検討

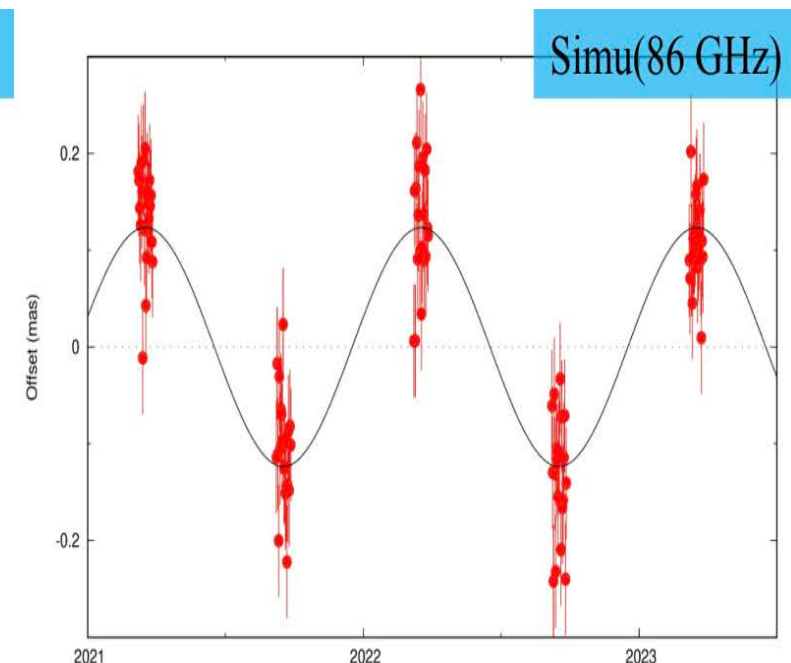
表 1: VERA 43 GHz と EAVN 86 GHz で推定される位置誤差。

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

年周視差シミュレーション



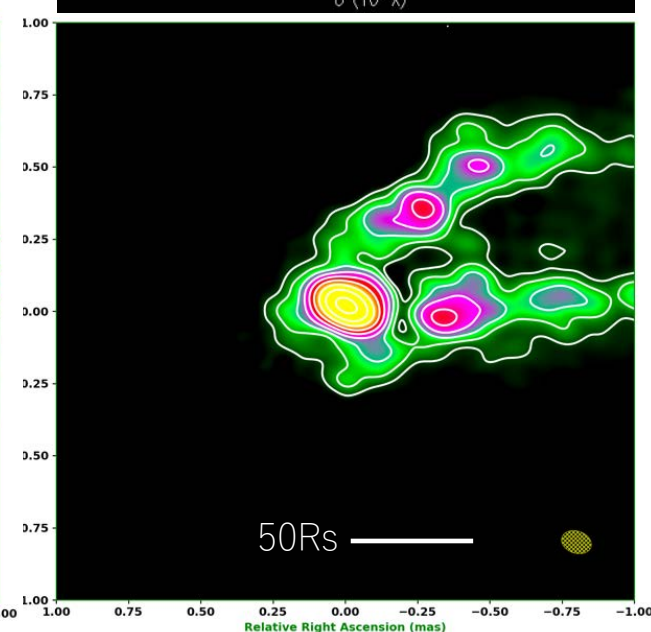
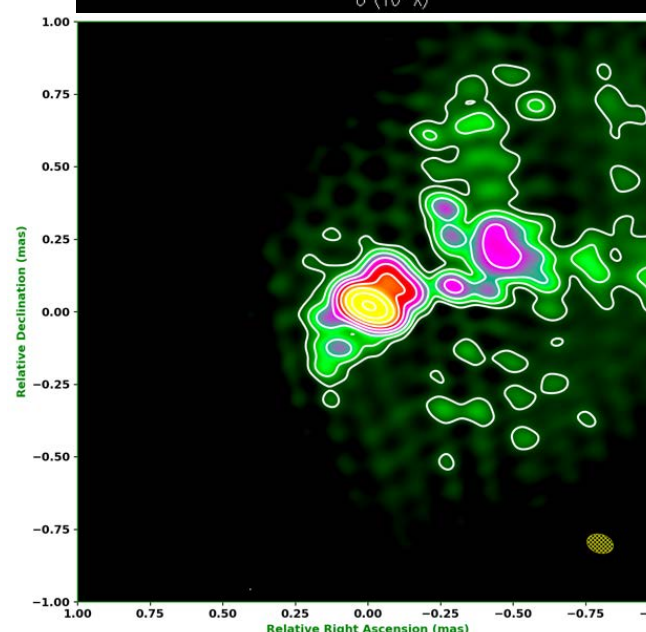
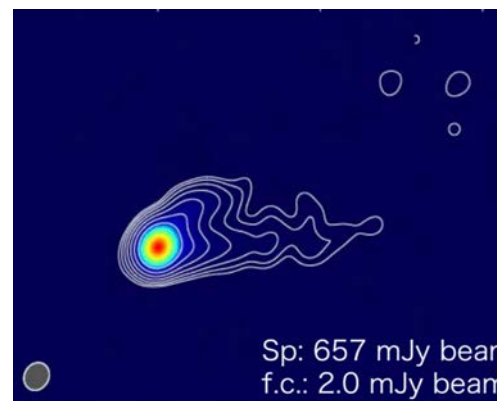
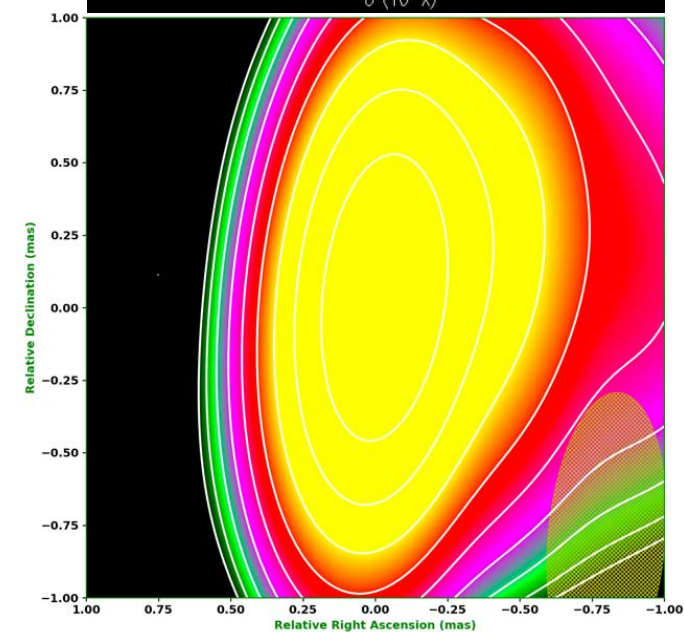
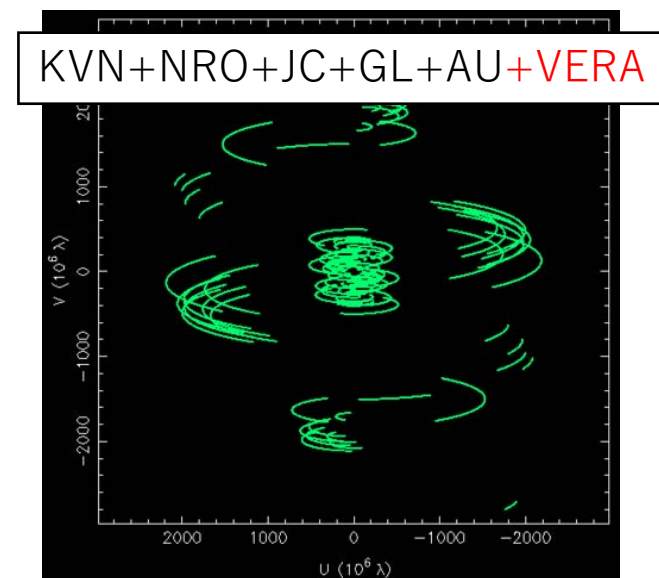
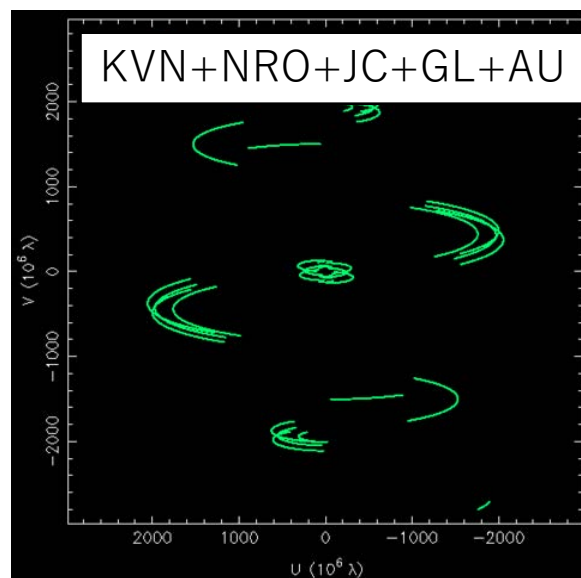
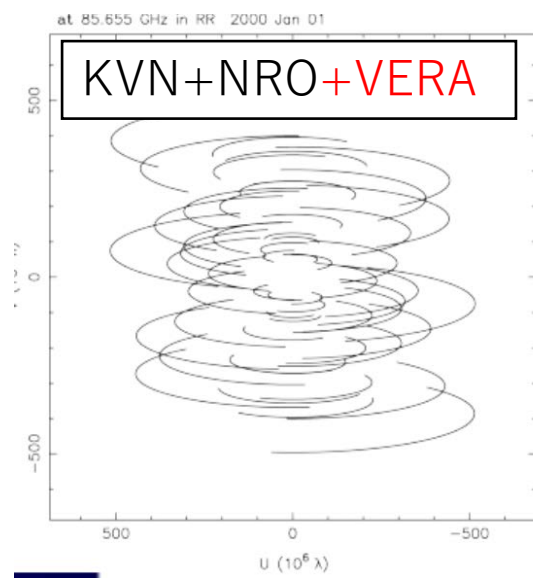
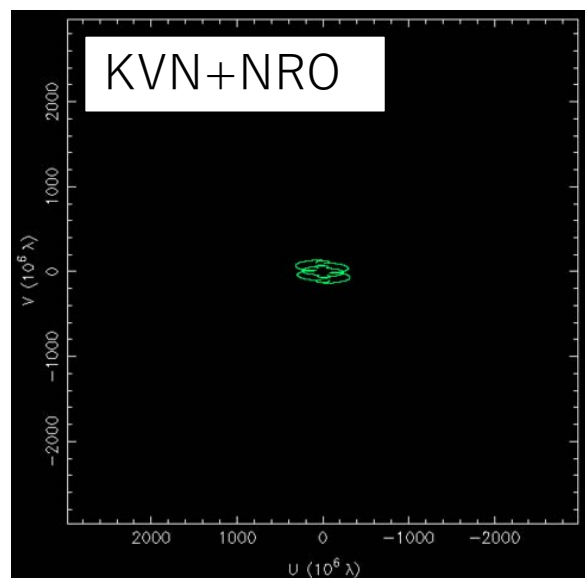
$\Pi: 123 \pm 10 \mu\text{as} (8.15^{+0.70}_{-0.60} \text{ kpc})$



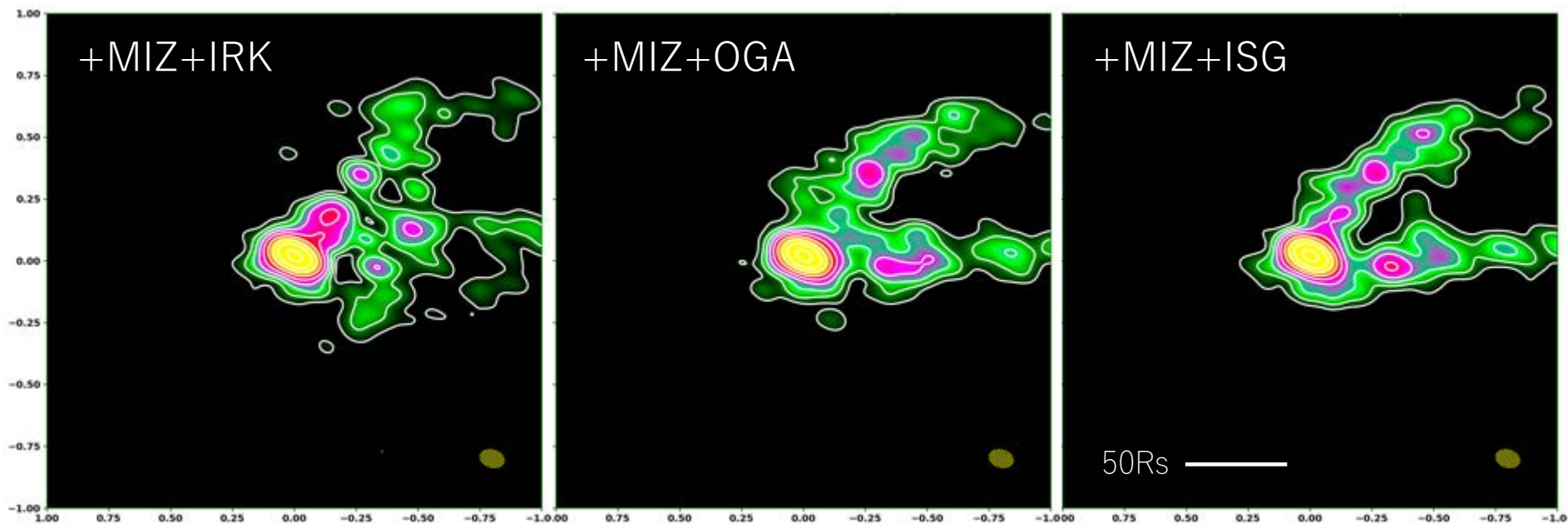
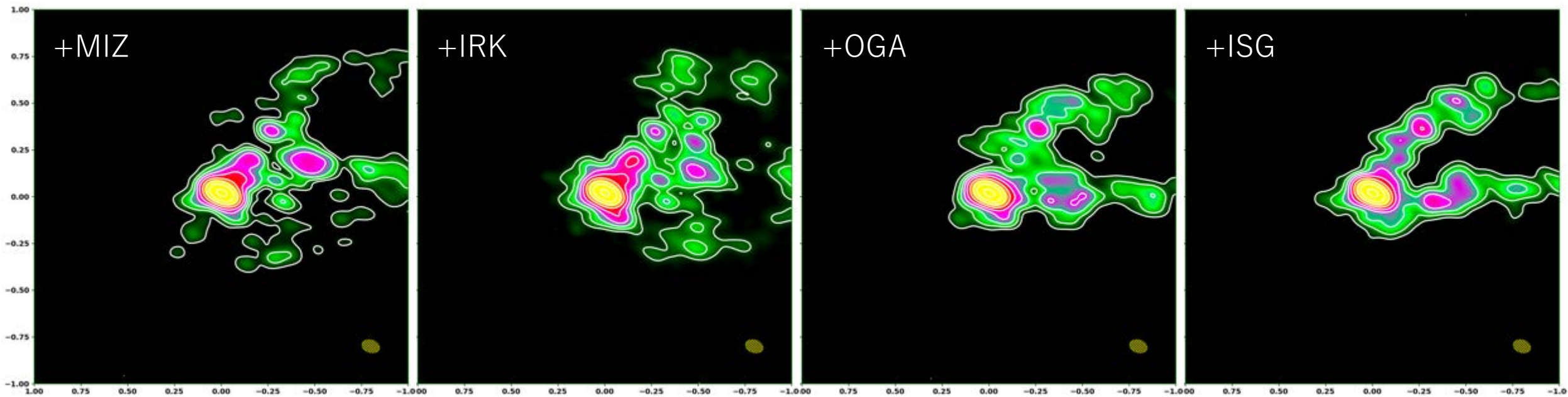
$\Pi: 124 \pm 6 \mu\text{as} (8.09^{+0.41}_{-0.37} \text{ kpc})$

EAVN 86GHzではVERA 43GHzに比べ位置精度が約 2 倍改善し、
年間20回 x 4年の観測で年周視差~3%実現

M87イメージングシミュレーション



KaVA+NRO+JC+GL+AU: VERAから1局 or 2局 入れた場合



VERA 大気@86GHz

SecZによる τ_{00} 実測 (左K, 右Q)

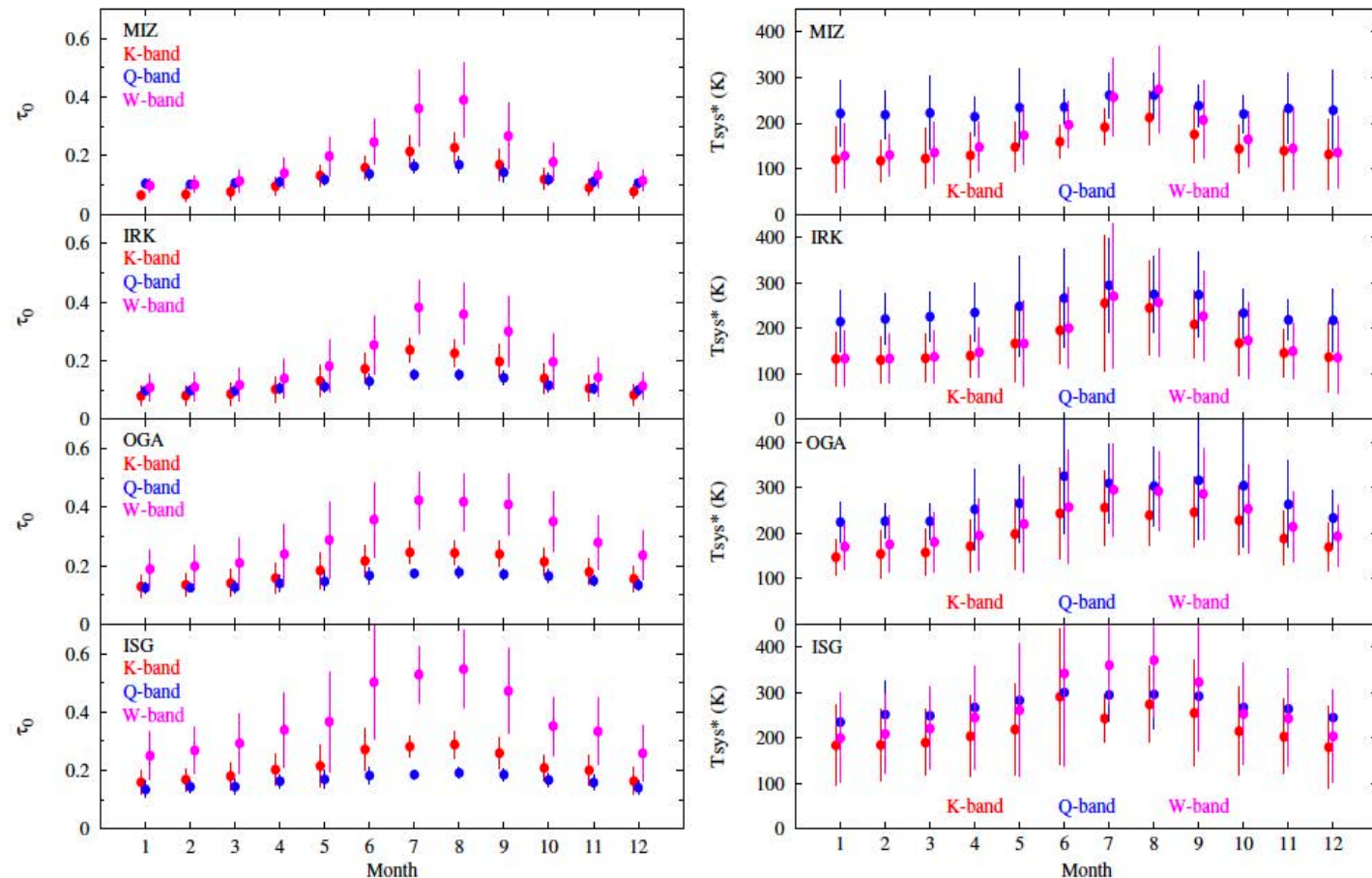
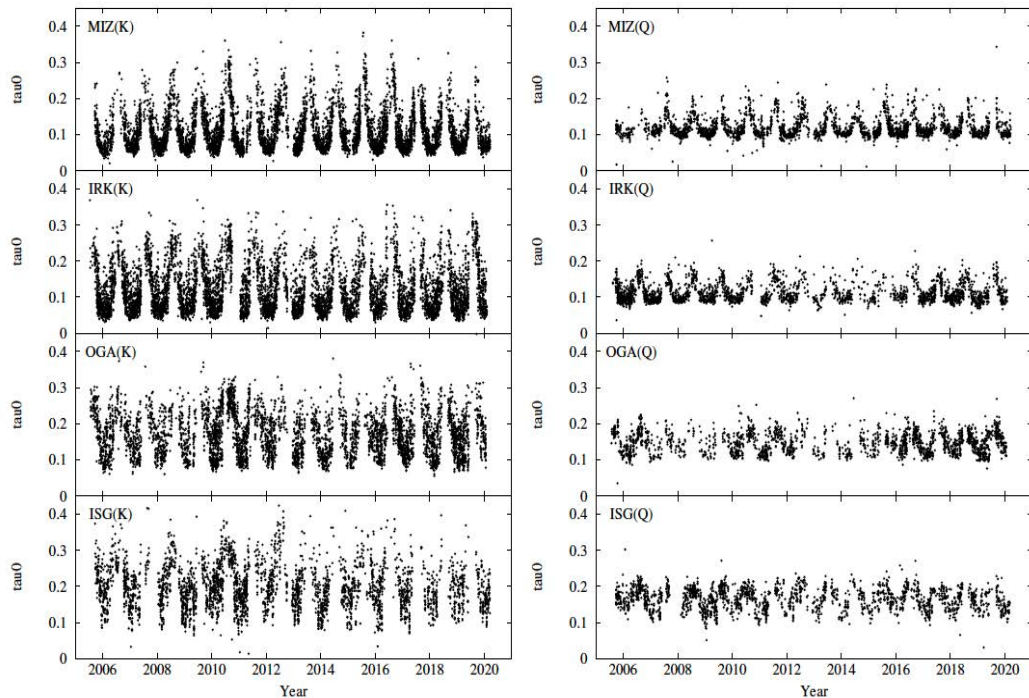
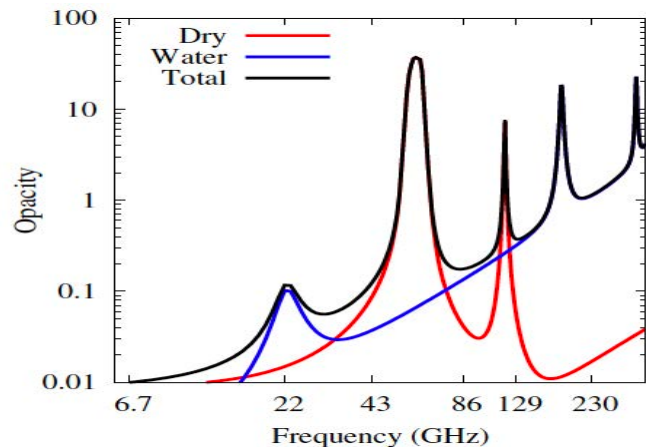


図 7: τ_0 と T_{sys}^* の 1 年間の変化。K-band と Q-band は実測値で、W-band は ITU-R 2013 のモデルを用いた推定値。点は平均値、バーは標準偏差を表す。



- SecZ実測による $\tau_{00}(22/43G) \rightarrow$ 大気モデルを通して $\tau_{00}(86G)$ を推定
- $\tau_{00} < 0.2$ の割合が水沢・入来60-70%, 小笠原26%, 石垣9%
- 案外観測できそう

VERA 86G見込

- SgrAアストロメトリ
 - EAVN86GではVERA43Gに比べて位置精度 2 倍程度改善
 - EAVN86Gでは年間20回 x 4年の観測で年周視差~3%実現 (↔ VERA43GHz 16年必要)
- M87画質
 - EAVN86Gでジェットの初期加速領域(30-300Rs領域)が高DRでイメージ可能
 - 特に石垣があるといい
- 大気各局フィージビリティ
 - 水沢・入来は結構いけそう. 小笠原も思ったほど悪くない. 石垣はやや厳しい見積りに
- 開発WGからのフィードバック
 - フィドーム透過率 100GHz帯で0.988 → 問題なし
 - 鏡面精度 10-20% ?
- 感度を上げるためには広帯域、周波數位相補償、野辺山などセットで考える必要

ミリ波スペースVLBI

- 詳細は土居さん講演
- ミリ波スペースはSMBHシャドーサイエンスに革新をもたらす究極的望遠鏡
 - 解像度 $<10\mu\text{as}$ 達成可能：シャドー微細構造
 - 低軌道衛星 or 複数衛星で短時間でuv埋まる：時間変動、高品質画像
- 米国・欧州でもブレーンストーム始まる
- 日本では宇宙研/気球GPを中心に技術検討
 - 小型衛星クラス（ $\phi \sim 2\text{m}$ ）？
 - スペースSKA用の低周波アンテナもつける？

サイエンス-必要性能/開発項目マトリックス (数値はまだラフ)

	キー周波数 (GHz)	アレイ、 キー局	多周波同時 受信	広帯域	空間分解能	位置精度	時間分解能	両偏波	スペース
SgrA位置天文	43/86/(130)	VERA, EAVN	Yes	>8Gbps?		50uas (視 差精度 4uas)	春と秋に 各20回ず つ		
SgrA CMZ	22	EAVN 大口徑		>8Gbps?		視差精度 5uas			
ジェット生成機構	43/86/(130)	VERA, EAVN, 野 辺山	Yes	>32Gbps	<100uas		Biweeklyで 通年	Yes	(Yes)
シャドー微細構造	230/350	スペース	(Yes)	64Gbps	<10uas			Yes	Yes
シャドー多様性	230/350	スペース	(Yes)	64Gbps	<10uas				Yes

タイムライン（主にミリ波関連）

超短期（～2022年3月）

- 研究
 - SgrA/CMZ: VERA 22/43GHz広帯域アストロメトリ継続
 - SMBH: KVN+NRO 86G観測スタート. EAVN-EHT 22/43GHzキャンペーンの継続
- 開発
 - EAVN 22/43GHz 広帯域化, 両偏波化 (OCTAD全局配備、定常運用化)
 - VERA 86GHz化の具体化(受信機, 設置, 局, 予算等)
 - スペース: ISASリサーチグループでの検討活動（ミッション成立性の基本的検討）

中期計画（～2027年度）

- 開発
 - VERA 86GHz実装, EAVN 22/43/86GHz観測網定常運用
 - スペース: ISASワーキンググループを経てミッション提案・プリプロジェクト化
- 研究
 - VERA/EAVN 22/43/86Gによる高頻度モニターを行い、SgrA/SMBHのサイエンスゴールに取り組む

長期（～10-20年）

- メインはミリ波スペース

まだ検討余地項目（サイエンス関連）

- 低周波サイエンス（～1-15G）
 - 「第3の柱」に据えたい
 - SKA、スペースSKA、ngVLA、多波長連携、マルチメッセ、分野横断
 - 銀河－AGN feedbackコネクション
 - AGN熱的成分(降着円盤、ウィンド, BLR, トーラス等)の直接撮像
 - 宇宙最初($z \sim 10$)のAGN/SMBHのサブパーセクスケール撮影
 - 急成長するSMBH周辺ガスのRM測定
 - ジェット多層構造、衝撃波、ホットスポット等の高品質撮影・磁場構造の可視化
 - IceCubeやCTA等MWL/MMS天体の放射領域の撮像
 - 南天アストロメトリ
- 「VERA/EAVN 86G」と「space 230/350G」の間
 - 世界的な「ngEHT」検討の本格化（地上EHT局を大幅増）
 - 日本はASTEやSPARTを用いたミリ波VLBI実験の経験
 - 国内にもEHT局？（eg, 富士山, 乗鞍）

中間報告まとめ

- 銀河班では主にミリ波を用いたSgrAアストロメトリとSMBHイメージングを柱としたサイエンスを検討
- VERA 86GHzフィージビリティ検討
 - アストロメトリ、イメージングともにVERA86G化は強力
 - 思ったより観測できるかも
 - 広帯域、多周波同時受信、野辺山とセットで考えるべき
- 短中期的には自前/既存の装置を活用・アップグレード
- 長期的には230/350Gスペース
- 要検討
 - 低周波/波長横断サイエンス, 国内EHT地上局
 - 必要性能/開発項目やタイムラインの更なる具体化