

# 将来計画WG 銀河班 中間報告

## 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？

2020年9月25日

水沢VLBI観測所ユーズミーツミーティング

# 背景

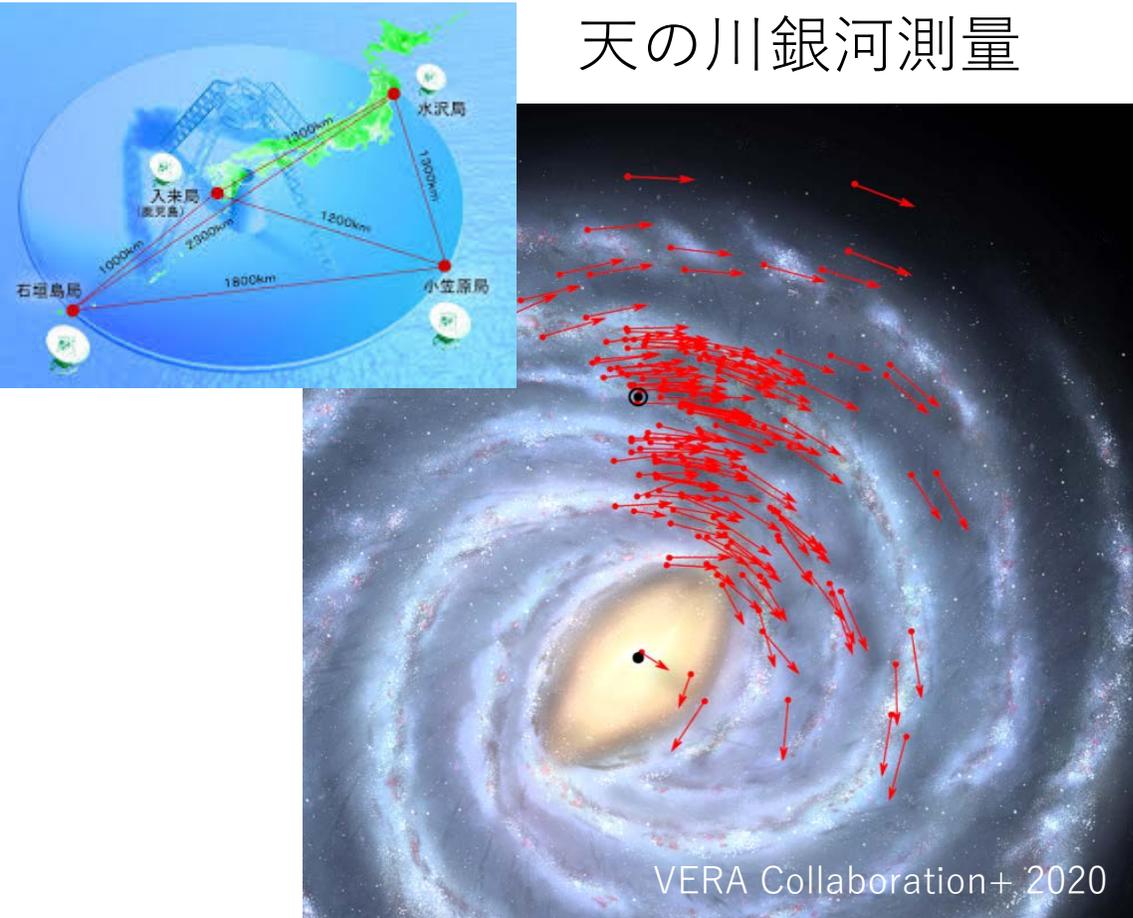
- 銀河は宇宙を構成する最も重要な天体の1つであり、我々も天の川銀河の中に住んでいる
- 銀河はいかにして形成されるのか？
- 天の川銀河の構造は？基本パラメータは？
- SgrA\*の正体、周辺領域の構造は？
- SMBHパラダイムは本当か？いかにして形成されたのか？
- AGN/SMBHの活動性（質量降着・放出）や、多様性を支配する基本パラメータは何か？
- 銀河とBHの共進化、宇宙論的進化は？



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

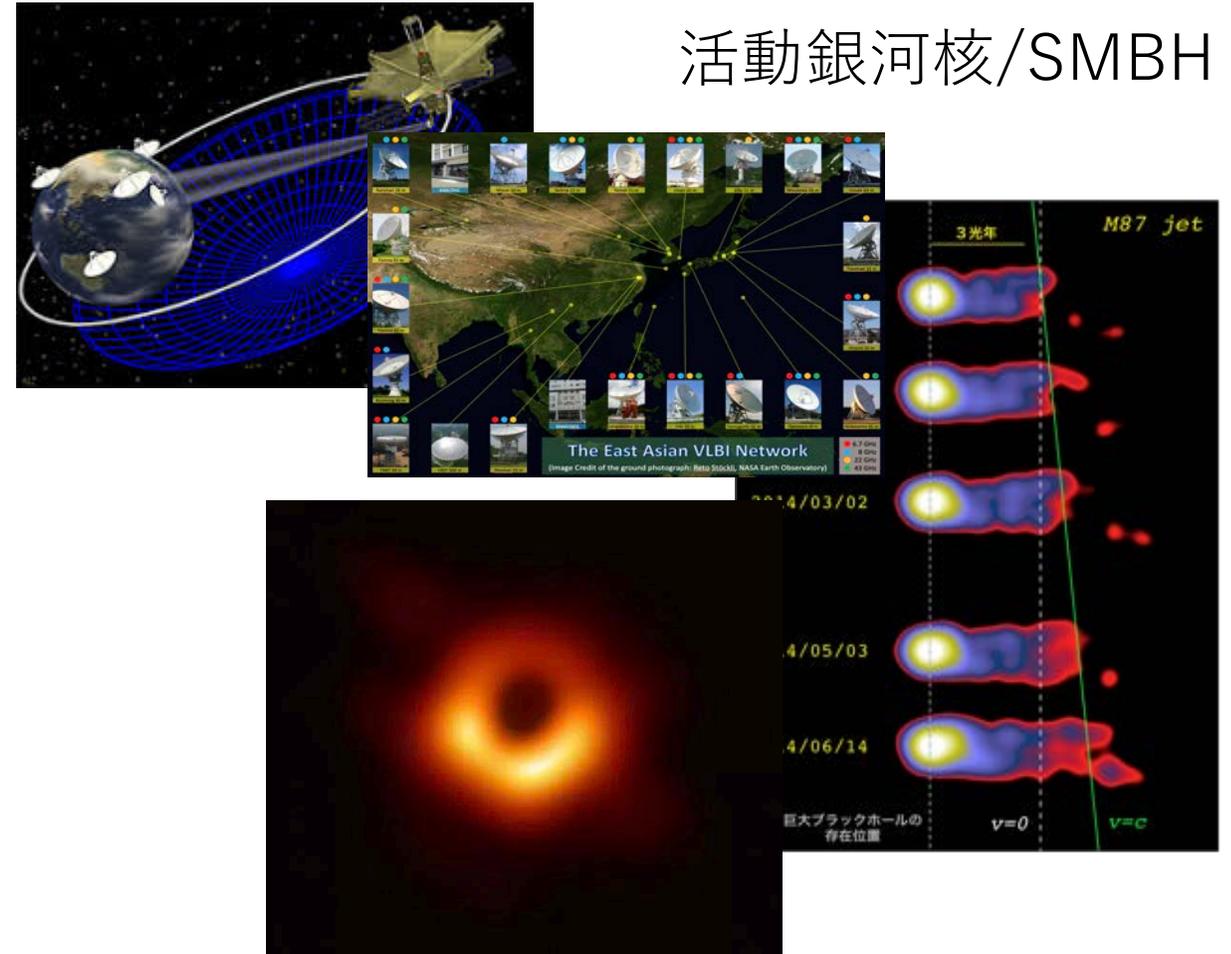
# これまでの日本VLBIコミュニティの達成度

天の川銀河測量



- VERA
- 銀河定数の導出
- 回転曲線、ダークマター分布、渦状腕構造

活動銀河核/SMBH



- VSOP/EAVN
- AGNジェット生成、核周構造、ガンマ線
- EHT SMBHシャドー撮影

## 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

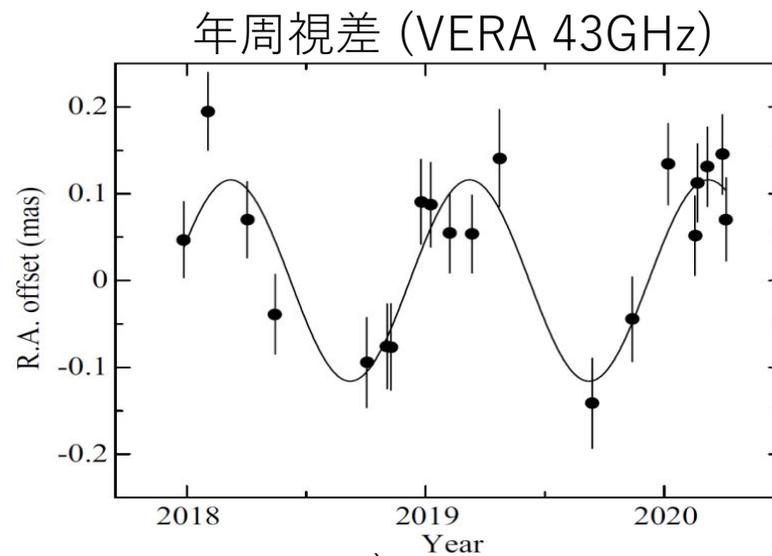
- 分野のトップサイエンス、挑戦的、天文学/科学全般にインパクト
- 天文学全体が共有する根源的問い
- VLBI/日本が独自性を発揮
- これまでの経験・技術・研究の蓄積を活かす
- ミリ波VLBI技術の躍進（更に高位置精度、高解像度撮影）
- 自前の望遠鏡を活かしたサイエンスは必ず必要
  - 自前(既存)装置を最大限活かすことが、将来的な大目標達成につながる
- 多波長/分野横断的視点（VLBIに凝り固まっても良くない）
  - EHT, SKA, ngVLA, TMT, ALMA, CTA, XRISM, KAGRA, IceCube etc
- 水沢将来計画(SKA)とのつながり
-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

# 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
  - 銀河系基本パラメータの決定
  - 中間質量BH, 巨大BHへの質量供給・形成メカニズム, AGN核周構造
- 2. SMBHホライズンスケール探査
  - BHからのエネルギーの引抜き
  - 天文学から重力理論・基礎物理を検証
  - SMBHパラダイム、普遍性と多様性
- (3. TBD 低周波/波長横断的サイエンス?)

# テーマ 1: Sgr A\* アストロメトリ

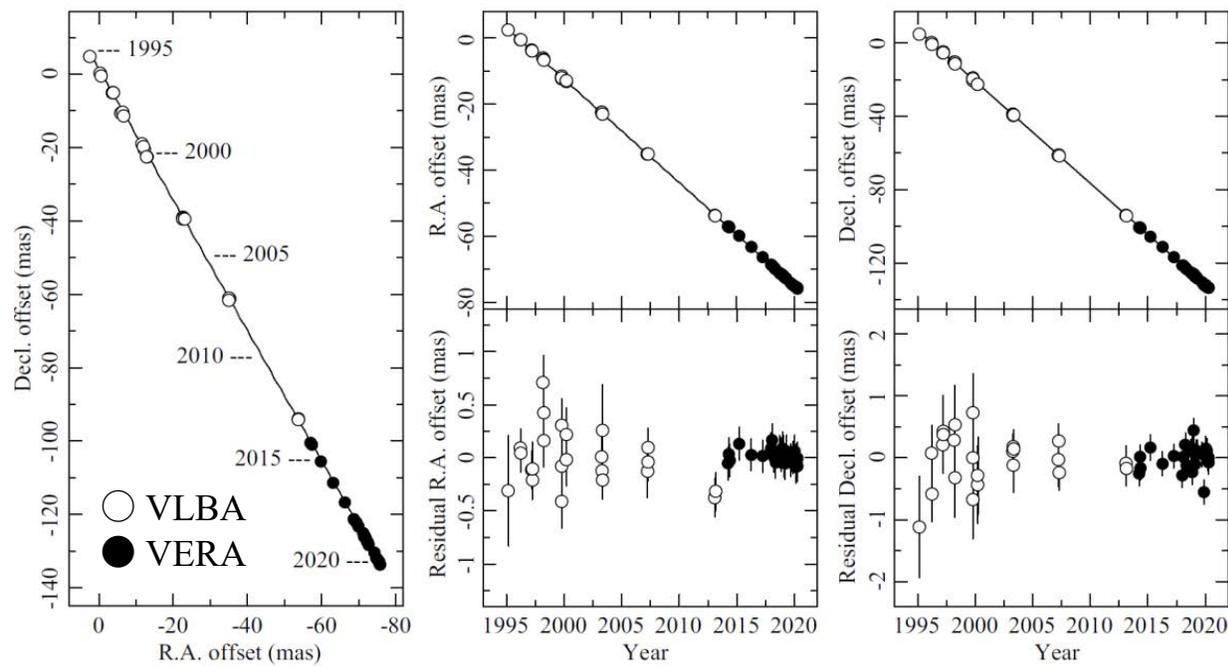
- 銀河定数  $R_0$ ,  $\Omega_0$  のダイレクトな測定
- 現状:  $8.5^{+1.5}_{-1.1}$  kpc ( $0.117 \pm 0.017$  mas) (15%)
  - $7.92 \pm 0.16_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{sys}}$  (4%) VLBI 189 src (VERA+ 2020)
  - $8.15 \pm 0.15$  (2%) VLBI 147 src (Reid+ 2019)
  - $8.178 \pm 0.013_{\text{stat}} \pm 0.022_{\text{sys}}$  (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)

固有運動 (VLBA+VERA 43GHz)

- 86GHzはDiffraction 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

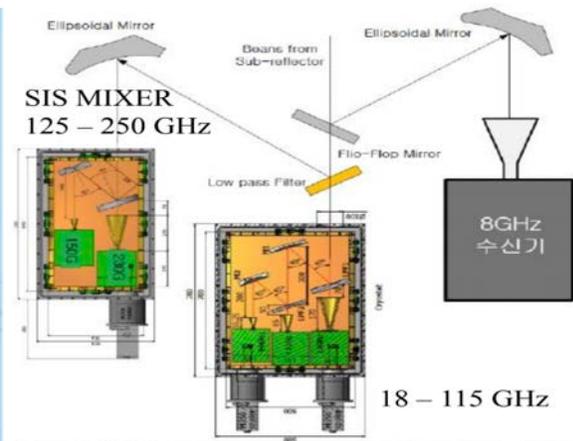
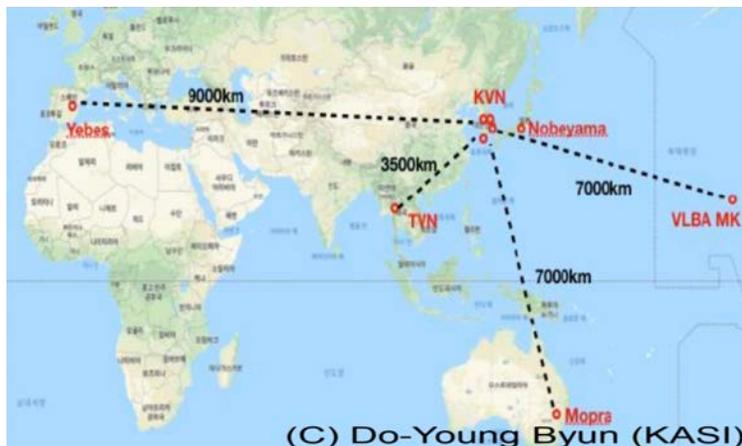
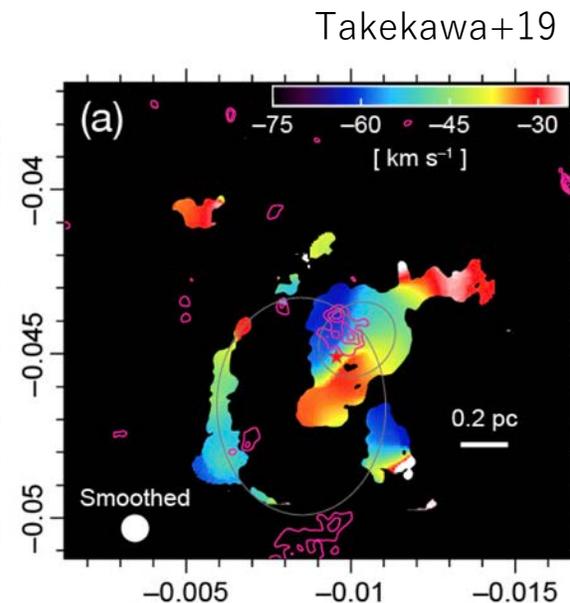
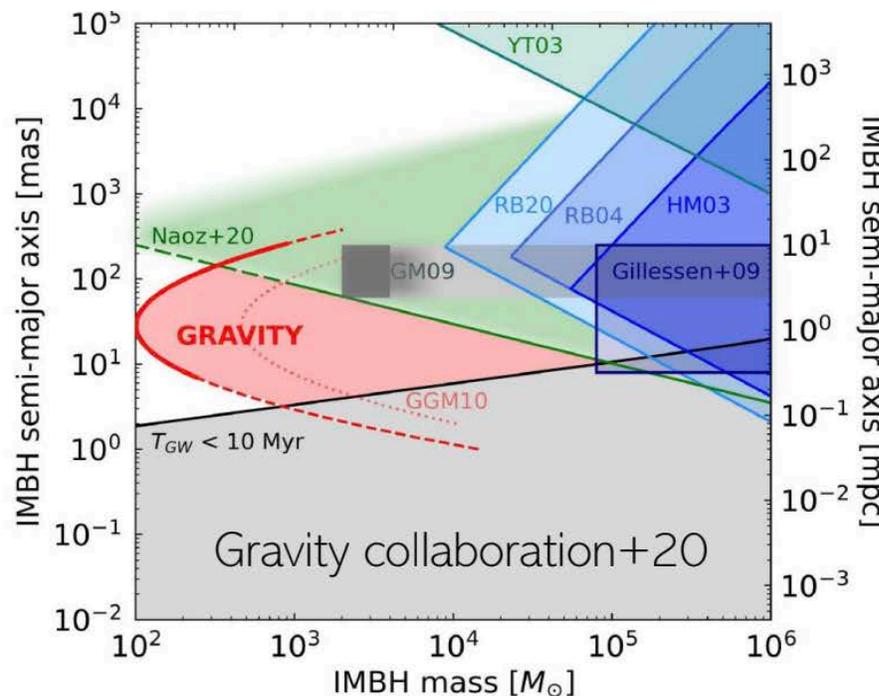


# テーマ 1: Sgr A\*アストロメトリ

- 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

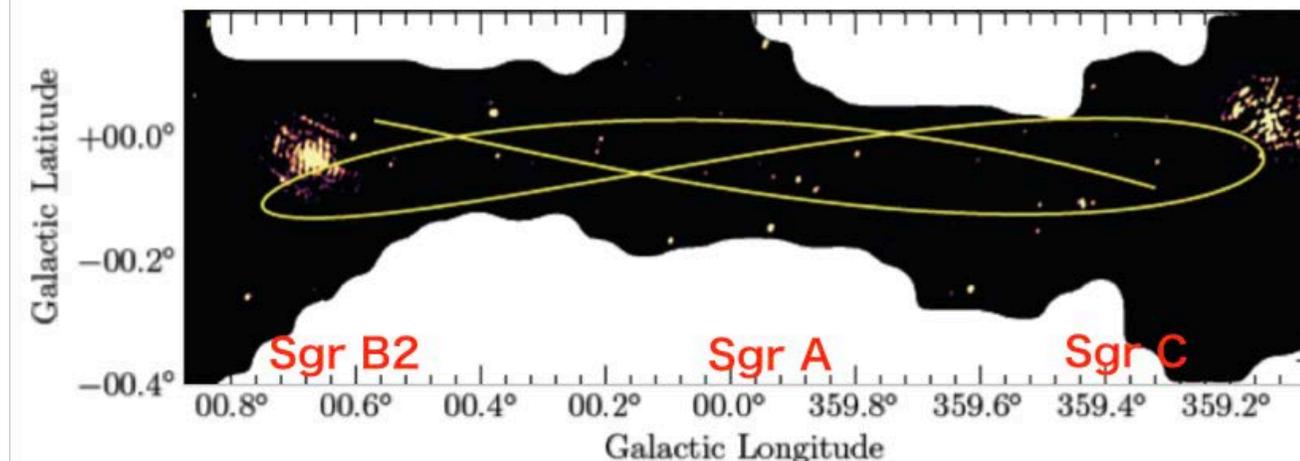
- $10^3 - 10^4 M_{\text{sun}}$  のIMBHの有無まで制限可能?



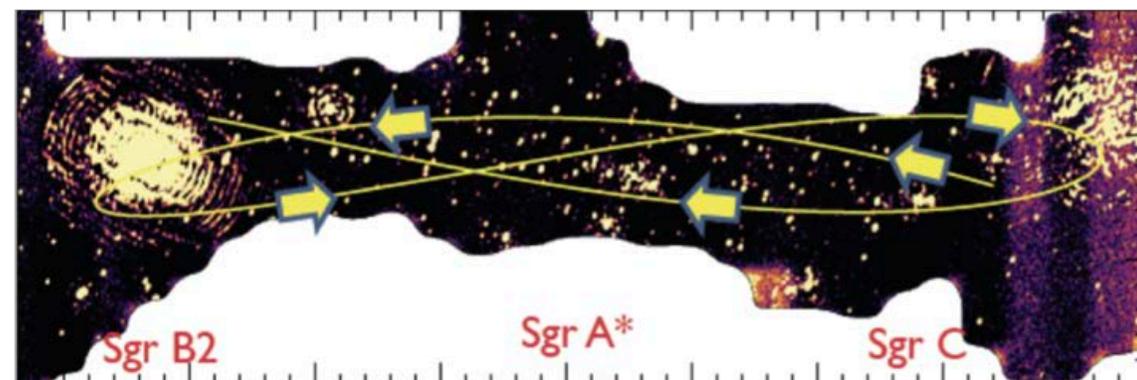
# テーマ 1: Sgr A\* 「周辺」 アストロメトリ

- 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)



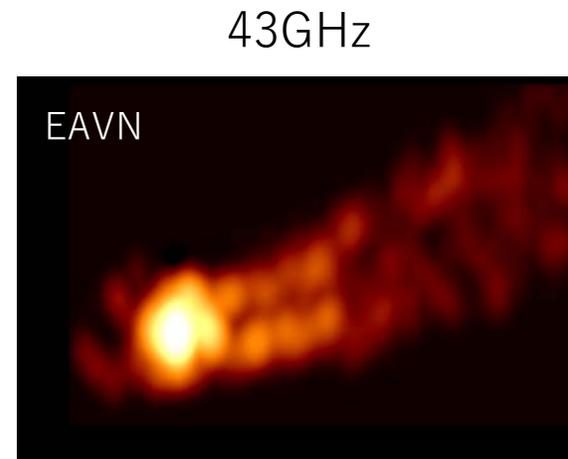
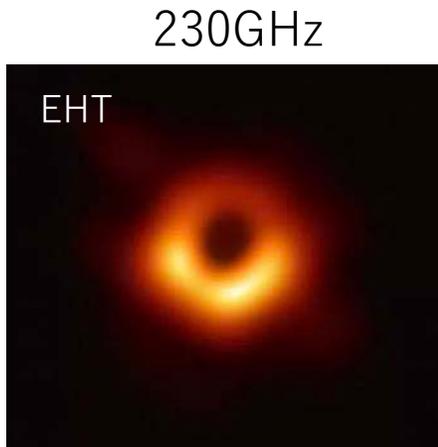
一桁感度が上がった時に検出可能な水メーザー(>0.1 Jy)



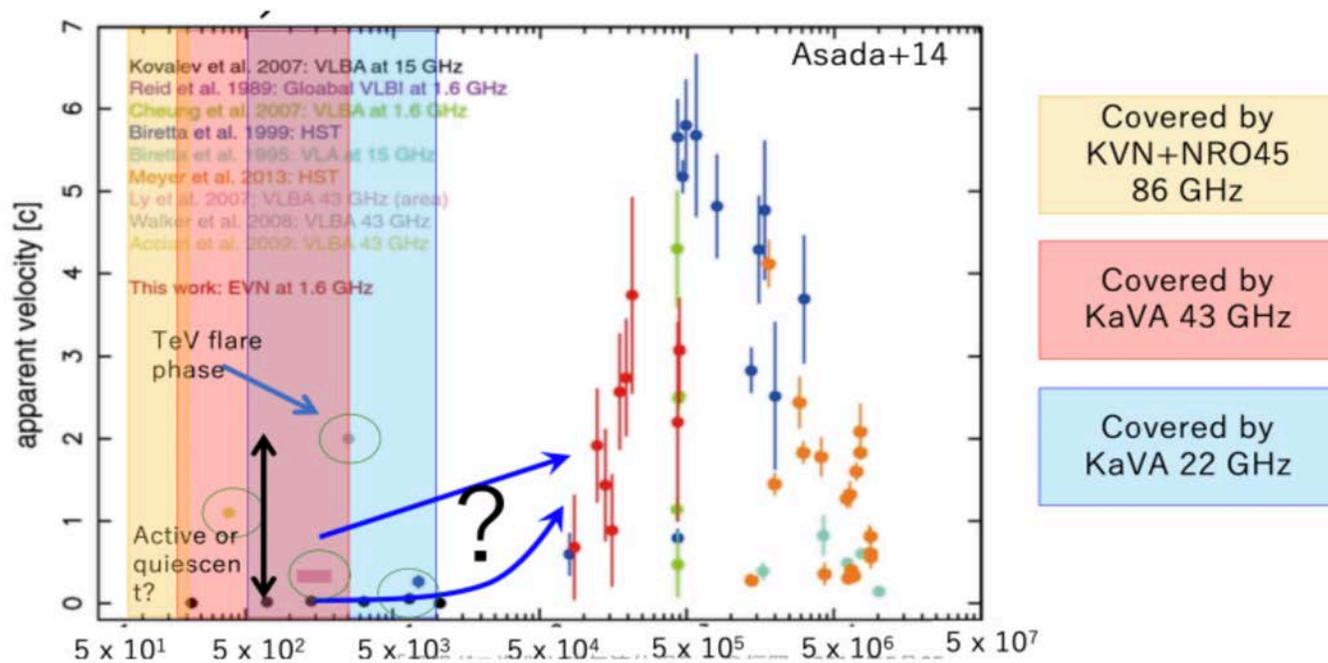
SWAG survey with ATCA

# 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~10-300Rs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

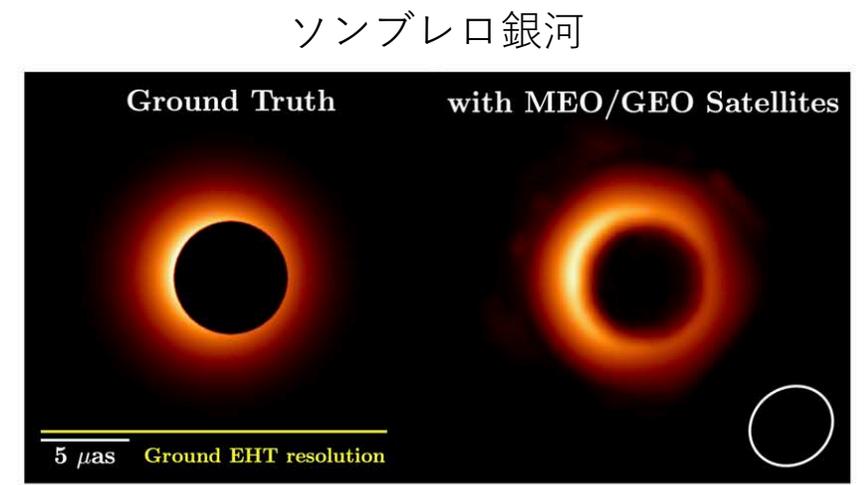
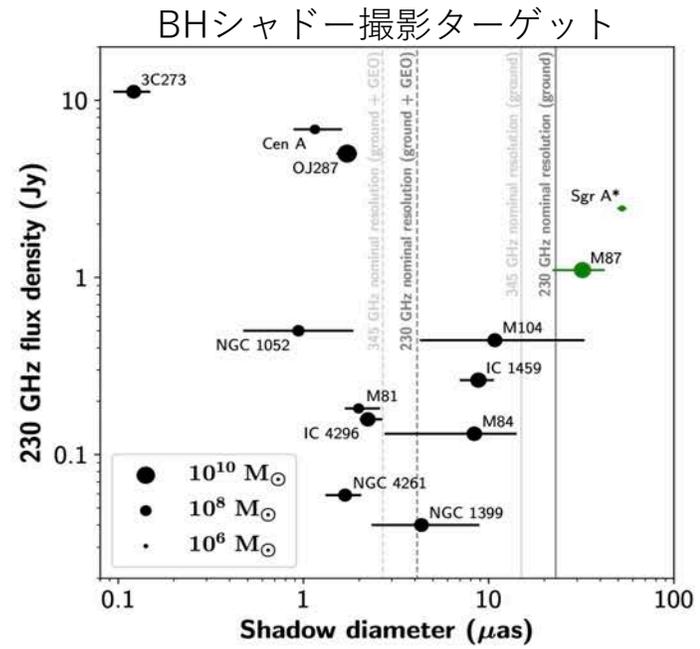
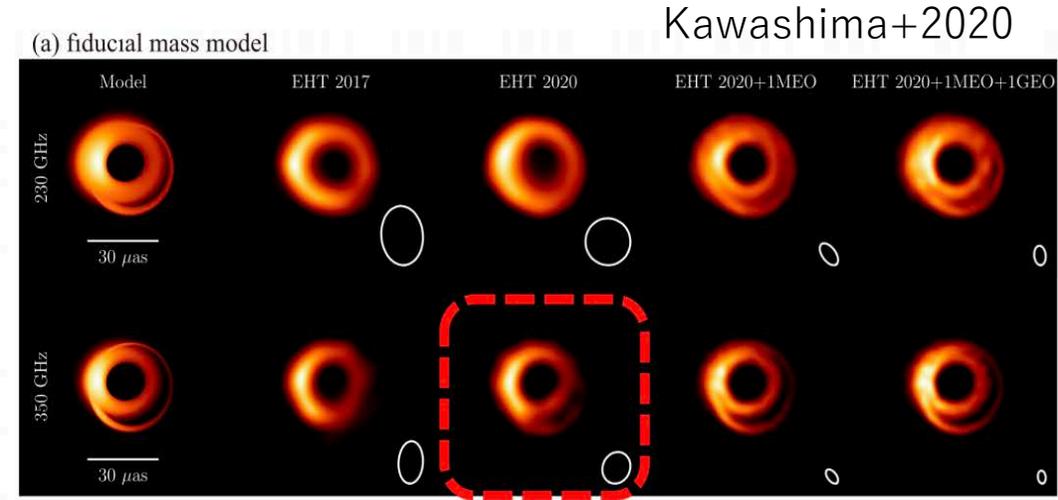
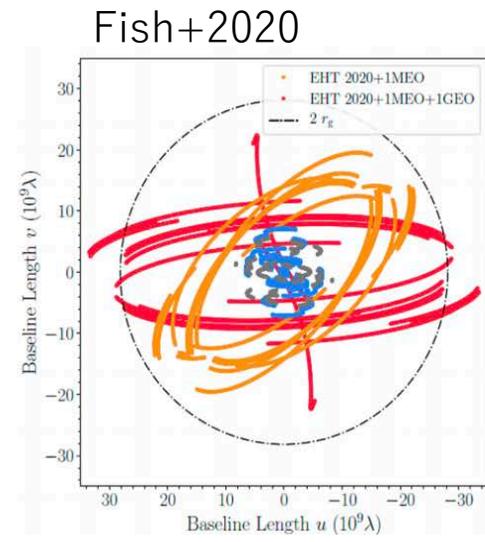


- 詳細形状はGMVA+ALMAで取組む
- 速度・加速度は86GHzで高頻度モニターできるアレイが必要
- → EAVN 86GHz  
(KVN+NRO+JCMT+GLT+VERA)



# 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
- シャドールの統計的研究へ
  - 近傍LLAGN
  - SMBH多様性



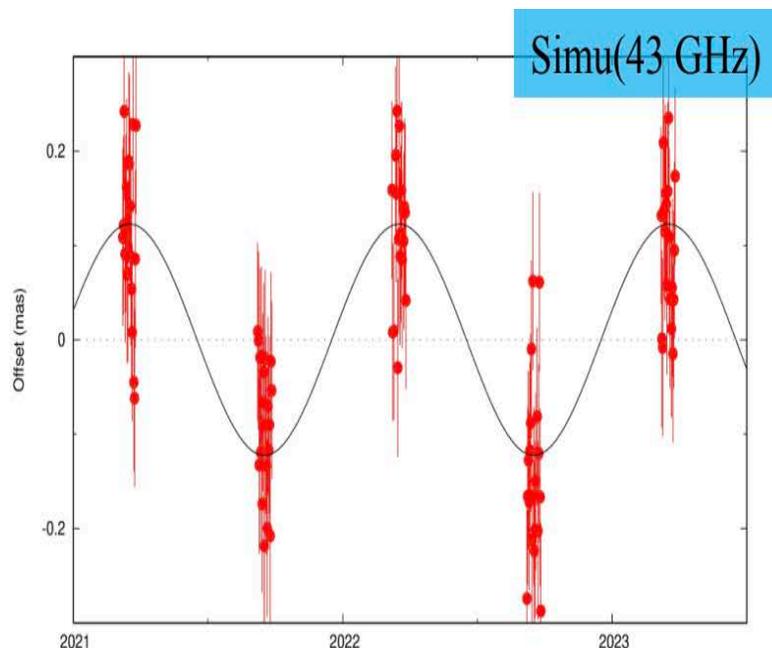
Doeleman+2019 (Astro2020 WP)

# SgrA 43/86G アstrometry 最適な観測期間と頻度の検討

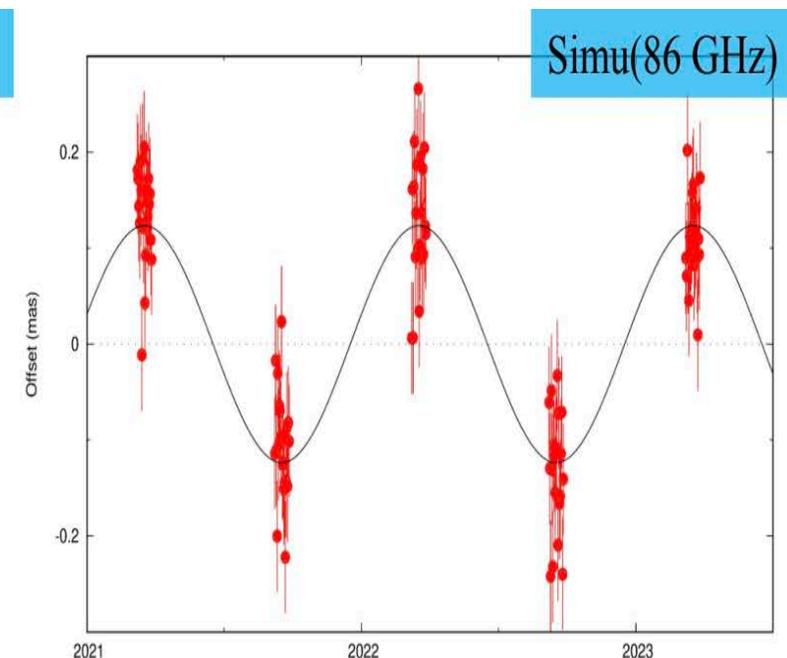
表 1: VERA 43 GHz と EAVN 86 GHz で推定される位置誤差。

Error source	43 GHz		86 GHz	
	$\Delta\theta_\alpha$ ( $\mu\text{as}$ )	$\Delta\theta_\delta$ ( $\mu\text{as}$ )	$\Delta\theta_\alpha$ ( $\mu\text{as}$ )	$\Delta\theta_\delta$ ( $\mu\text{as}$ )
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



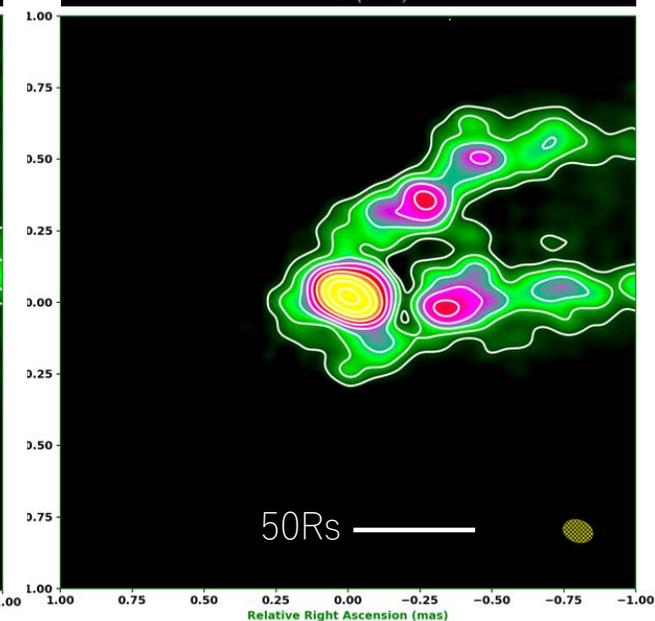
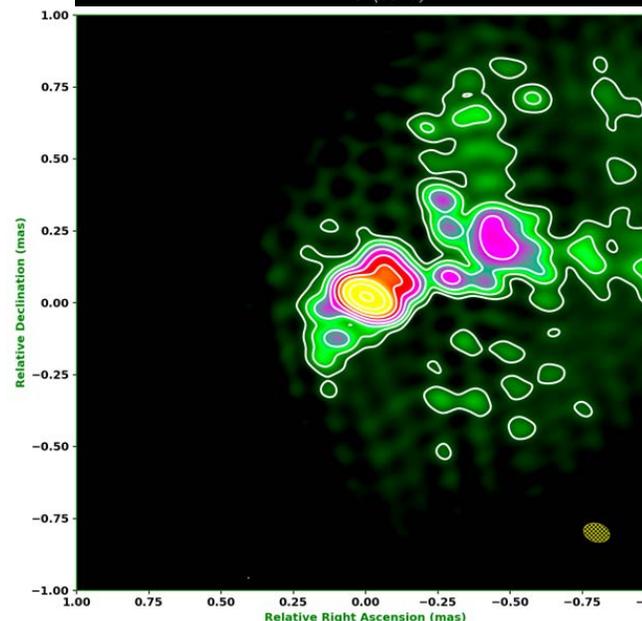
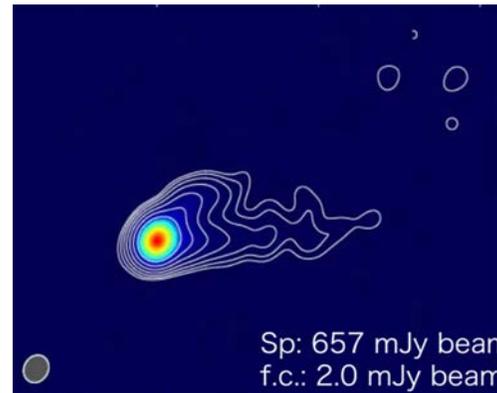
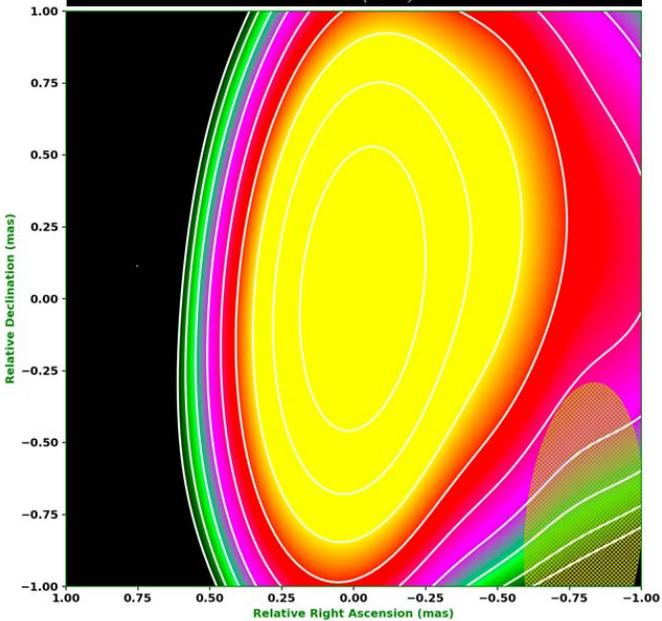
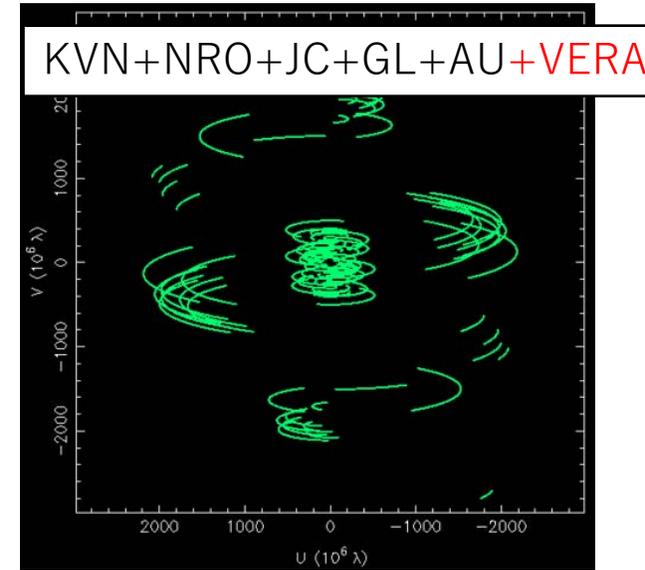
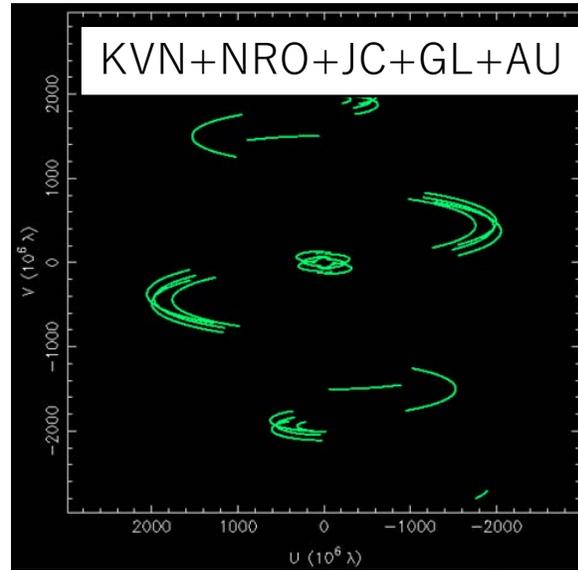
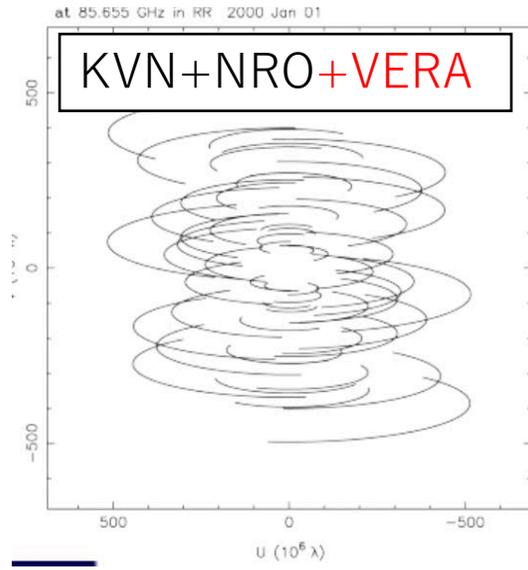
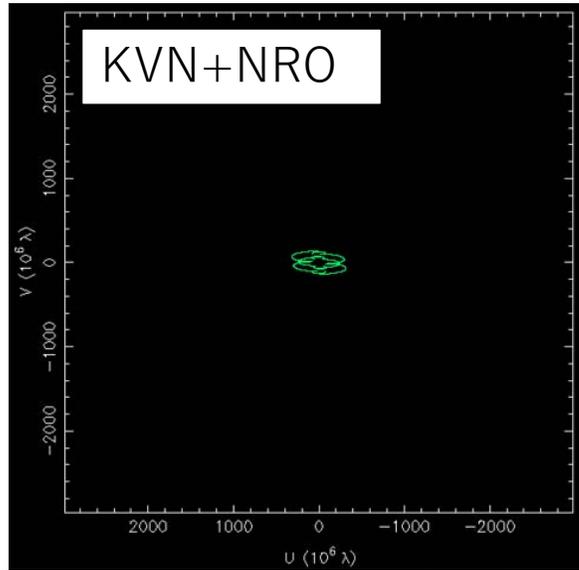
$\Pi: 123 \pm 10 \mu\text{as} (8.15^{+0.70}_{-0.60} \text{ kpc})$



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

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 EAVN 86GHzイメージングシミュレーション



# VERA 大気@86GHz

SecZによる $\tau_0$ 実測 (左K, 右Q)

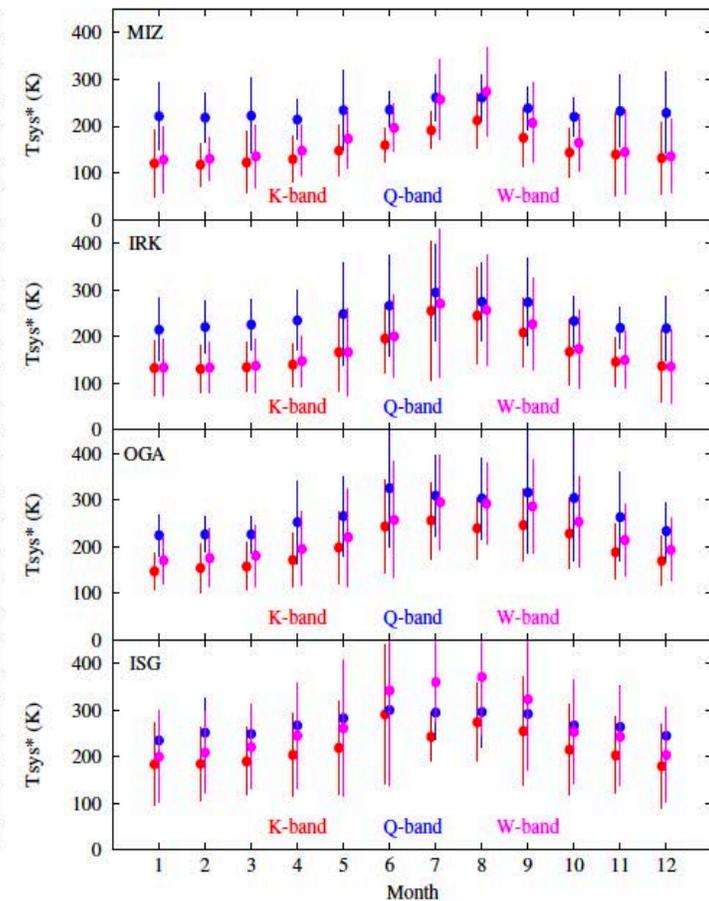
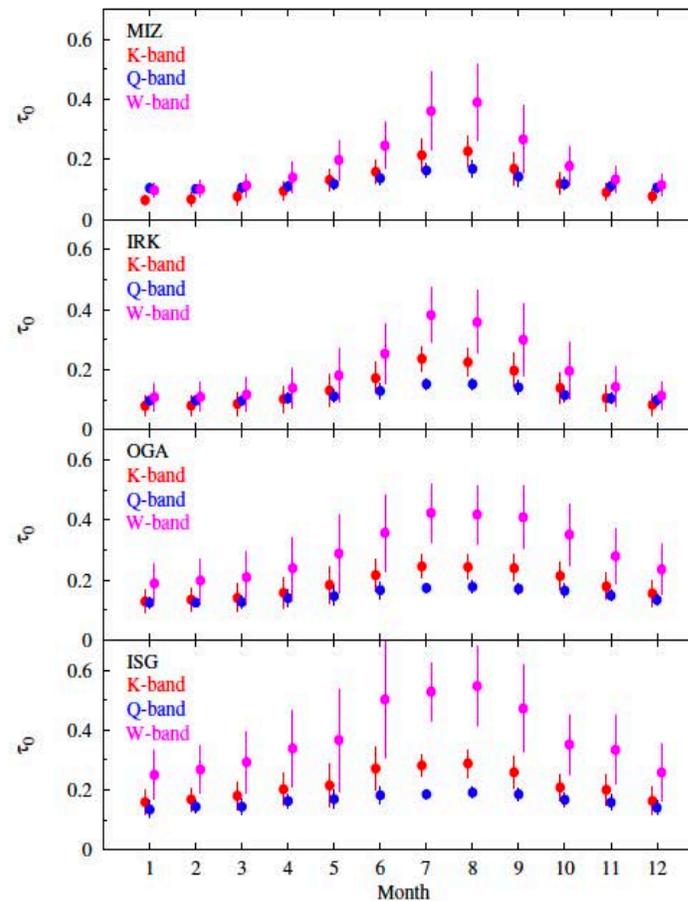
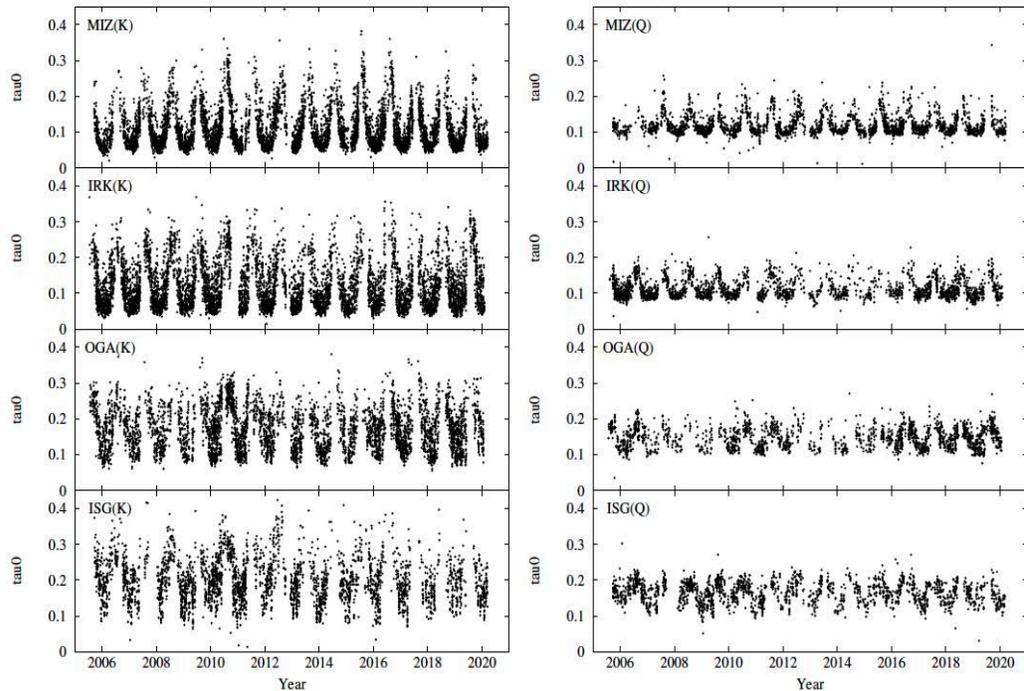
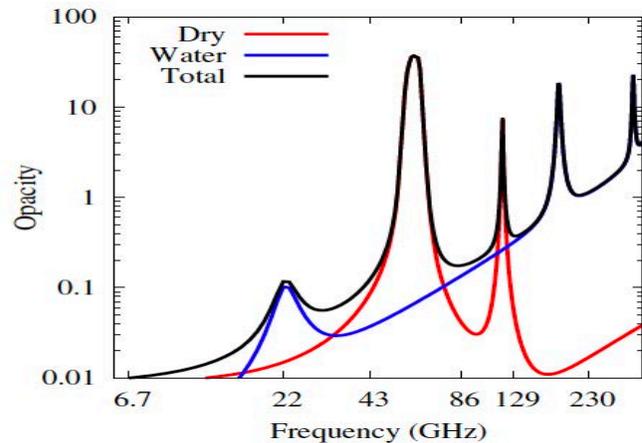


図 7:  $\tau_0$  と  $T_{sys*}$  の 1 年間の変化。K-band と Q-band は実測値で、W-band は ITU-R 2013 のモデルを用いた推定値。点は平均値、バーは標準偏差を表す。



- SecZ実測による $\tau_0(22/43G)$  → 大気モデルを通して $\tau_0(86G)$ を推定
- $\tau_0 < 0.2$ 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 86GHz化 見通し

- 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

# まだ検討途中項目

- 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」の間をどう繋げていくか
  - 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)