

歳差運動するM87ジェットの噴出口 ～ 巨大ブラックホールの「自転」を示す新たな証拠 ～

発表者

秦 和弘 (国立天文台水沢 / 総合研究大学院大学) : 研究背景・日本の貢献

紀 基樹 (工学院大学 教育推進機構) : 観測結果・今後の展望

川島 朋尚 (東京大学 宇宙線研究所) : 解釈・意義

本間 希樹 (国立天文台水沢 / 東京大学) : 日本の貢献



はじめに

- 日本の10の研究機関を含む、世界45の研究機関、79名の研究者による国際共同研究成果
- 本研究成果はCui et al. “*Precessing jet nozzle connecting to a spinning black hole in M87*”として英国の科学雑誌『ネイチャー』9月28日号に掲載されます
- オンライン版掲載および**報道解禁時刻：日本時間 9月28日 午前0時** (厳守でお願いします)
- 国内合同発表機関におけるwebリリース公開：9月28日 午前0時以降 順次

国内の合同発表機関

- 国立天文台
- 茨城大学
- 大阪公立大学
- 工学院大学
- 駒澤大学
- 総合研究大学院大学
- 筑波大学
- 東京大学 宇宙線研究所
- 東洋大学
- 山口大学

国立天文台以下
アイウエオ順

海外の合同発表機関

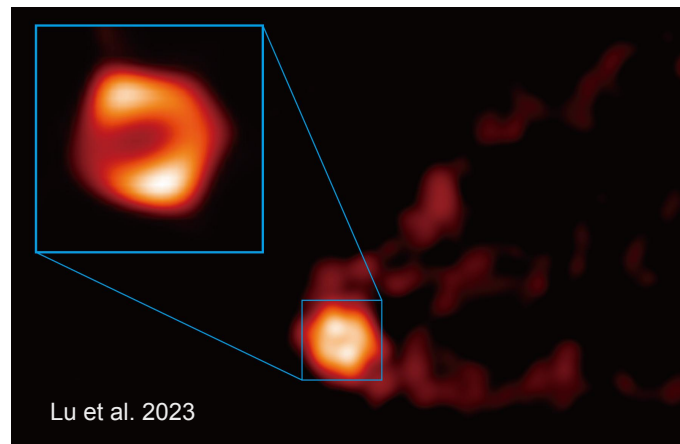
- 之江実験室
- 上海天文台
- 上海交通大学
- 雲南大学
- 韓国天文研究院
- 新疆天文台
- イタリア天体物理学研究所
- ポローニヤ大学
- スペイン アンダルシア天体物理学研究所
- マラヤ大学
- 他

研究の背景

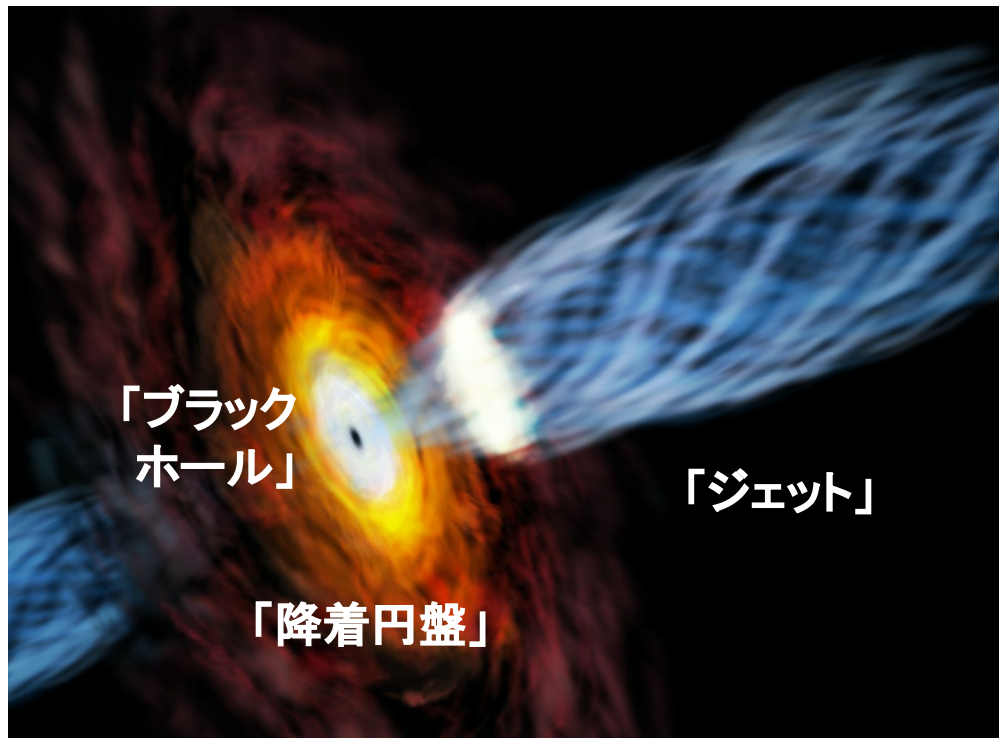
秦 和弘

M87について

- 地球から5500万光年の距離にある楕円銀河
- 明るい中心部は「活動銀河核」と呼ばれ、強力なジェットを噴出
- 2019年: イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT) によって撮影された巨大ブラックホールの画像が発表
- 今年の春: グローバルミリ波 VLBI 観測網によって撮影されたガス円盤 (降着円盤) の画像が公開
- 巨大ブラックホールの性質やジェットの発生メカニズムを探る「実験室」

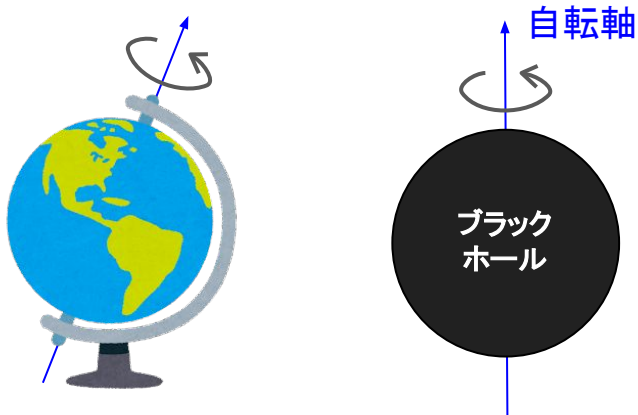


巨大ブラックホール「三種の神器」

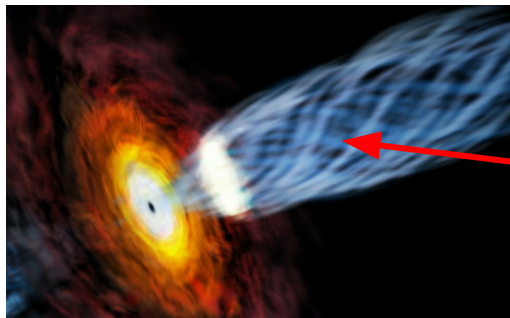


研究者の間で大問題:

「M87の巨大ブラックホールは自転しているか？いないか？」



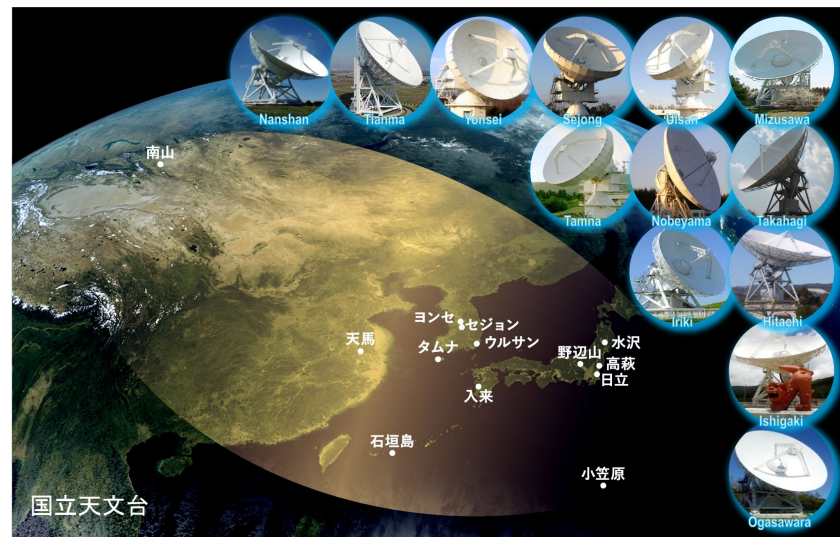
- 「自転」とは、ブラックホール自身の回転のこと
- 質量と並び、ブラックホールの特徴や時空構造を決める2大要素
- 強力なジェットの発生にも必要と予想されている
- しかし、観測から自転の有無を見極めるのはとても難しい



今回はジェットの「特殊な動き」に着目

今回の主力望遠鏡: 東アジアVLBIネットワーク(EAVN)

- 日本・韓国・中国の電波望遠鏡を中心に構成されるVLBIネットワーク
 - 2013年から日韓、2017年から中国も参加
 - 今回は計13局(日本7, 韓国4, 中国2)使用
- EAVNの特徴
 - 高感度・広視野でジェットの撮影に最適
 - 東アジアの「マイテレスコープ」として、たくさんの観測ができる
- 本研究では2013～2022年にEAVNで観測した123回分のデータに加え、過去に米国の望遠鏡で得られたデータも収集し、23年間に渡る合計170枚のジェットの画像を分析した結果を報告



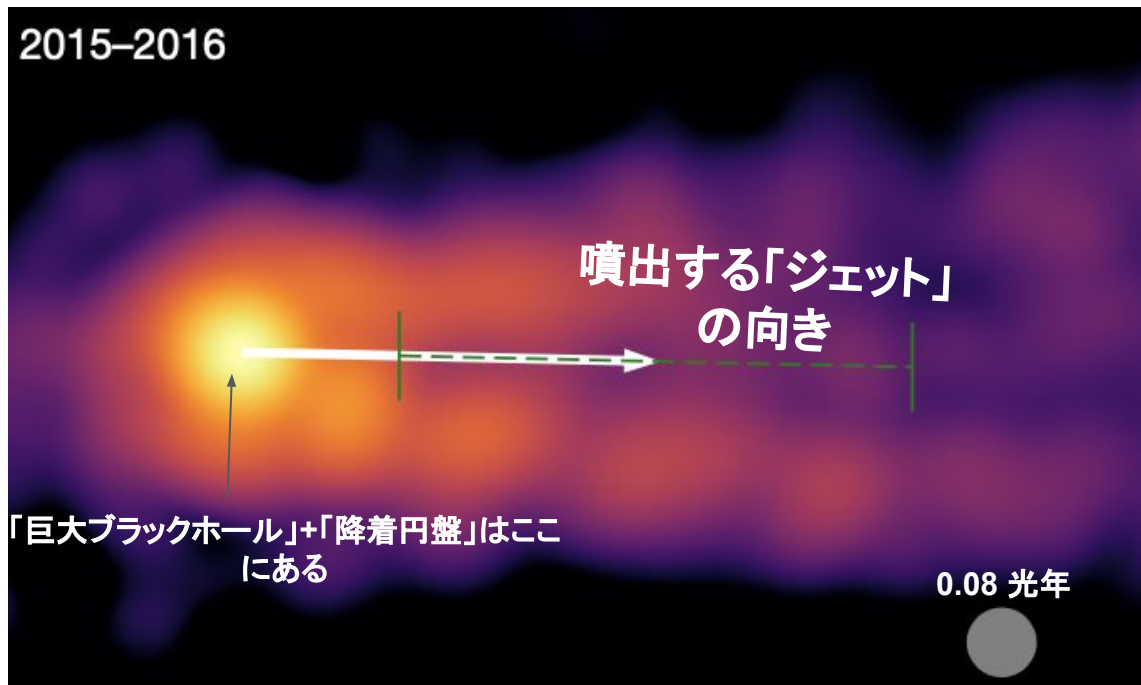
性能の比較	EHT	EAVN
観測波長	1.3ミリ	7ミリ, 13ミリ
視力	約300万	約30万
感度・視野	低い・狭い	高い・広い
観測対象	ブラックホール	ジェット

観測の結果

紀基樹

EAVNで撮影したM87 ジェットの画像

以下の画像では、実際のM87ジェットの向きを時計回りに18度回転しています。

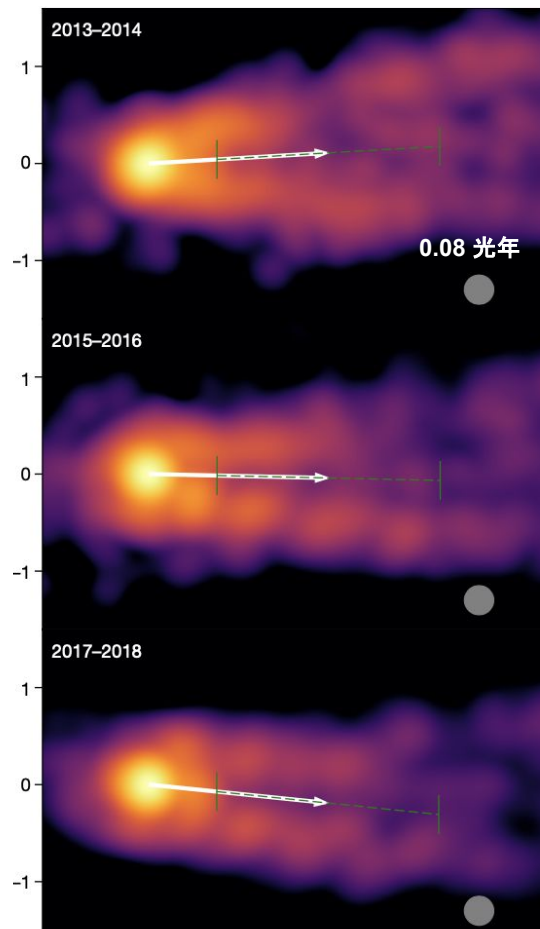


高感度、広視野のEAVNは
噴出するジェットの向きをク
リアに捉えられる!

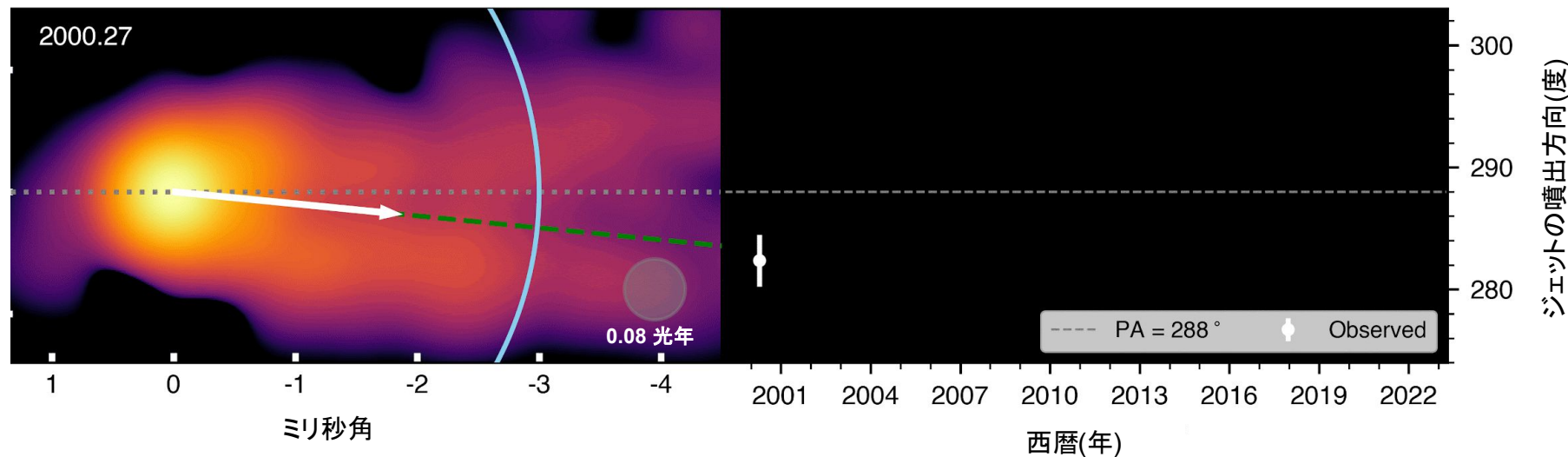
時間変化するジェットの様子

- 私たち研究チームは、観測を長期間継続することの重要性を早くから見抜き、2013~2022年の間に、EAVNで計123回という世界的にも類を見ない高頻度の観測を実行
- その結果、撮影したジェット画像から、**ジェットの噴出方向が時間変化している様子**が克明に捉えた!

実際のジェット画像例

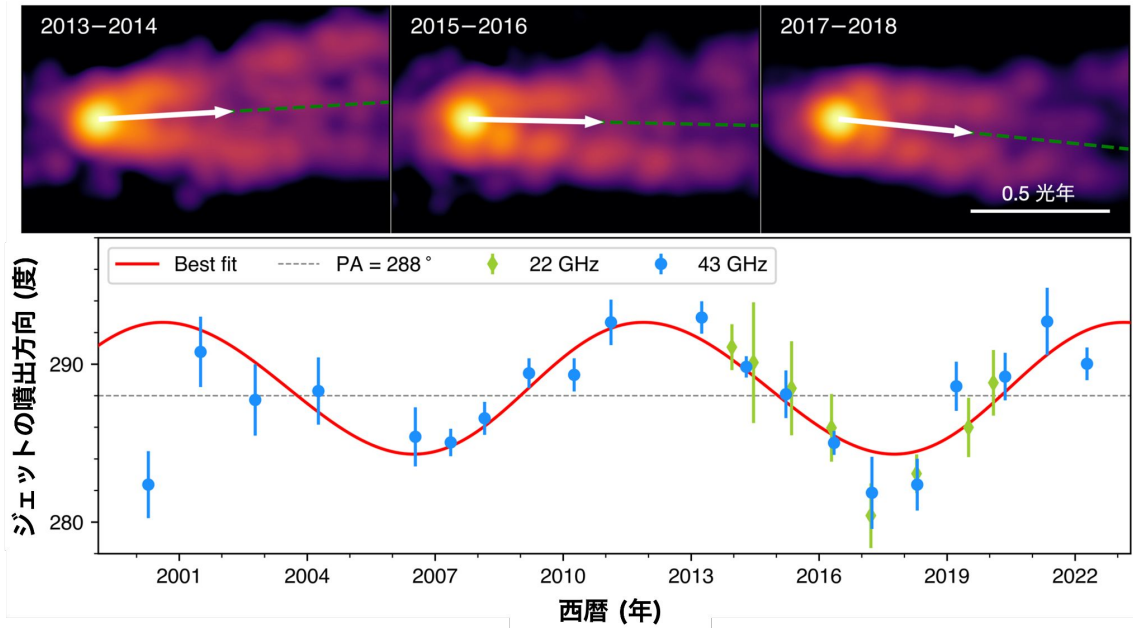


M87ジェット噴出方向変化の周期を捉えた！



米国で2018年出版の先行研究論文で「ジェットの横揺れ現象」が報告されていたが、周期の有無は分かっていた。周期を捉えたのは今回が初めて！

周期はおよそ11年



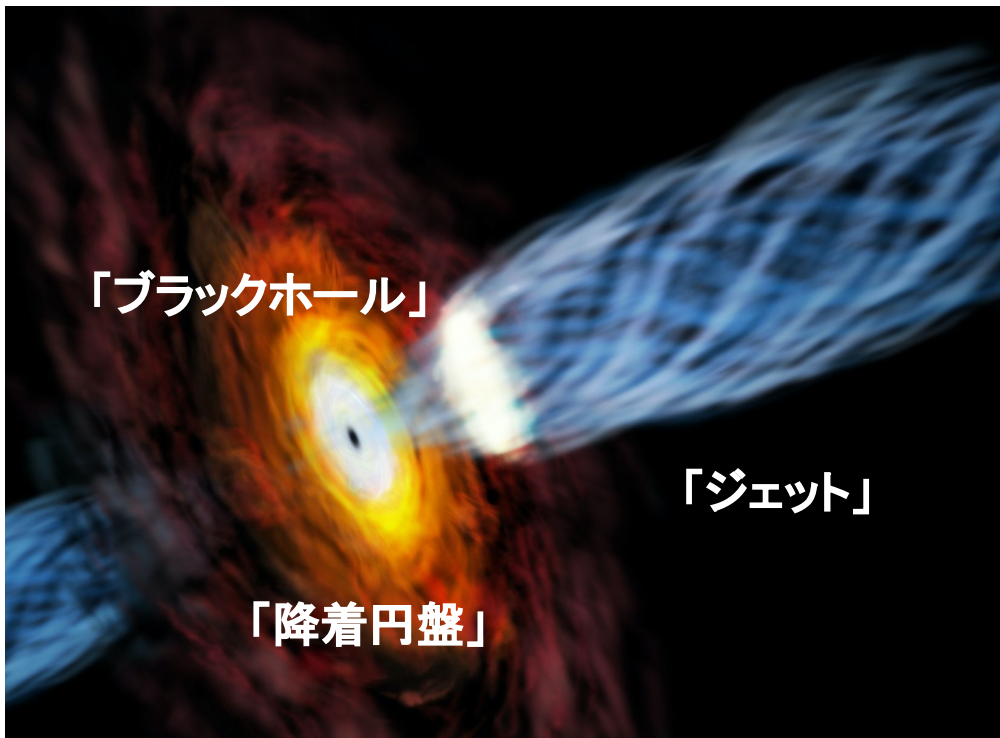
この11年周期をもたらす原因は何だろうか？

私たち研究チームは「**巨大ブラックホールの自転**」と「**ジェット**の噴出方向」のある関係性に注目して、原因についての理論的解釈を進めた。

解釈と意義

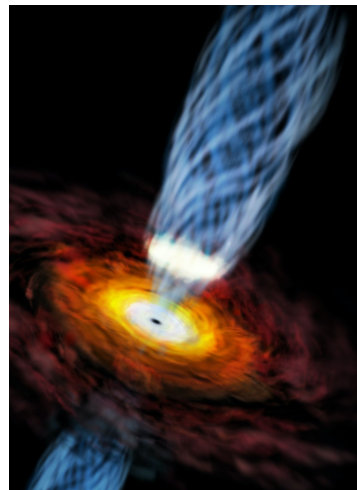
川島 朋尚

巨大ブラックホール「三種の神器」(再掲)



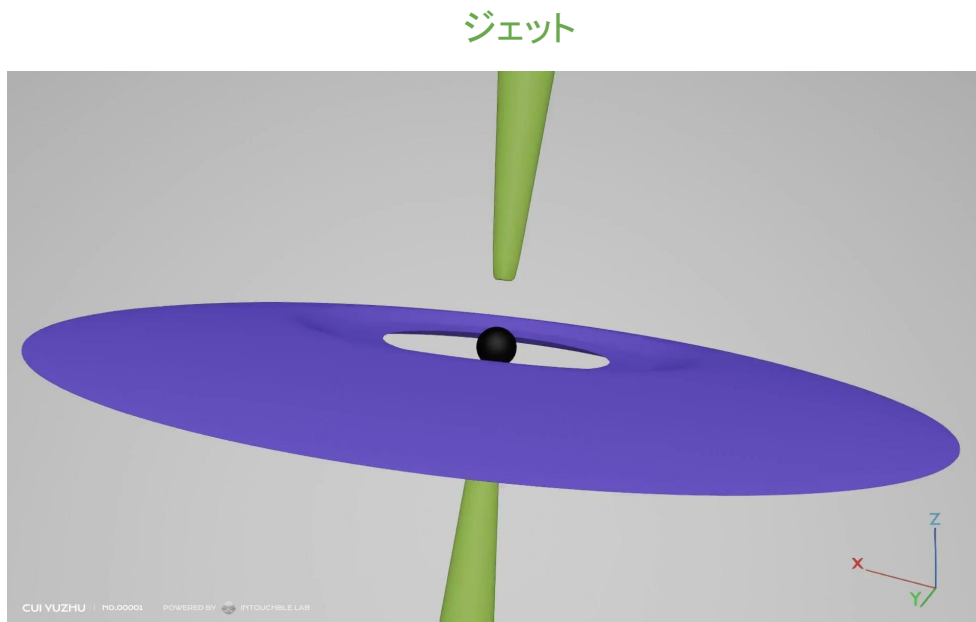
- ジェットは降着円盤に垂直に噴出する！

このあとジェットは縦方向になるように図示



レンズ-シリング(Lense-Thirring) 歳差運動

- アインシュタインの一般相対性理論はブラックホールの自転を予言
- レンズ-シリング歳差運動:
 - ブラックホールの自転(時空の引きずり)が起こす周期的な首振り運動。
 - 降着円盤の回転軸がブラックホールの自転軸とズレているときに起こる。(地球ゴマに類似。)
- 今回のジェットの観測周期を説明できるか? →理論シミュレーションで検証。



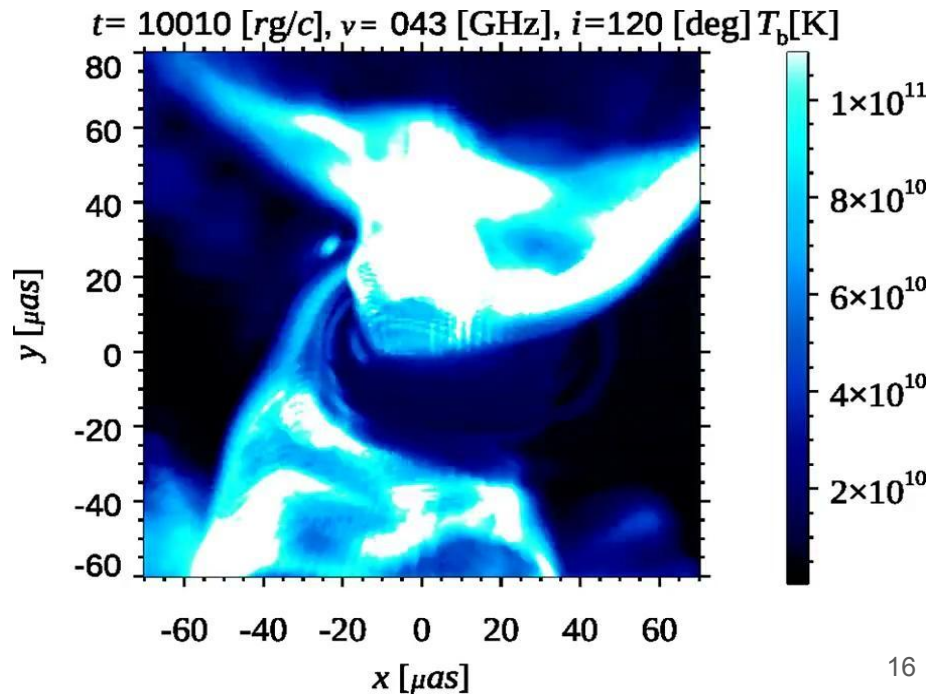
credit:Lucas Vieira

アテルイIIを用いた理論シミュレーション

- ブラックホール自転軸に対して回転軸の傾いた降着円盤の理論シミュレーション
- 国立天文台水沢設置のスーパーコンピュータ「アテルイII」を使用



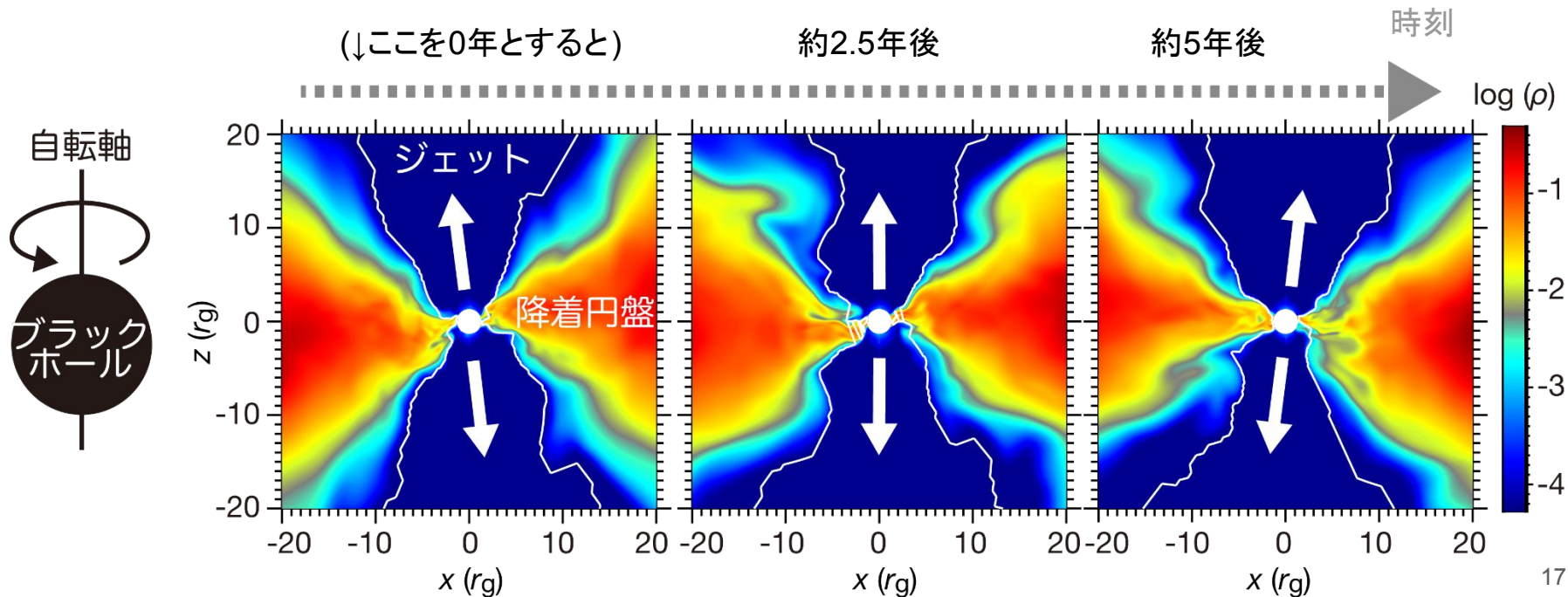
(※1000rg/c は約1年)



アテルイIIを用いた理論シミュレーション

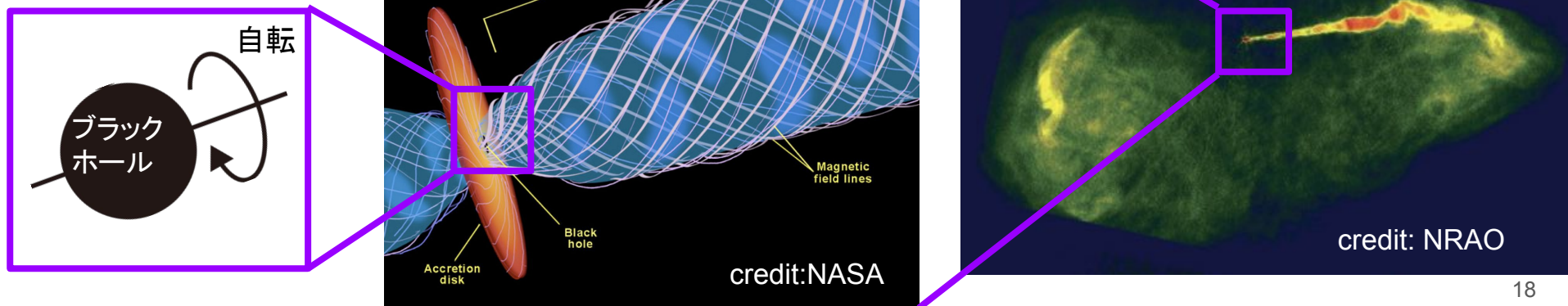
- 降着円盤のレンズ-リング歳差に伴い、ジェットも歳差運動。
- 約10年周期の歳差運動が確認 → 観測結果を裏付けた。

→ ブラックホールの「自転」を示す新たな証拠が得られた



本研究成果の意義

1. 一般相対性理論が予言するブラックホールの自転の強力な証拠が得られた。
2. 100年来の謎であるジェット形成機構の最有力仮説を支持。
3. 自転が生み出すジェットのエネルギー → 銀河の形成・進化の歴史を紐解く手がかりへ。



今後の展望

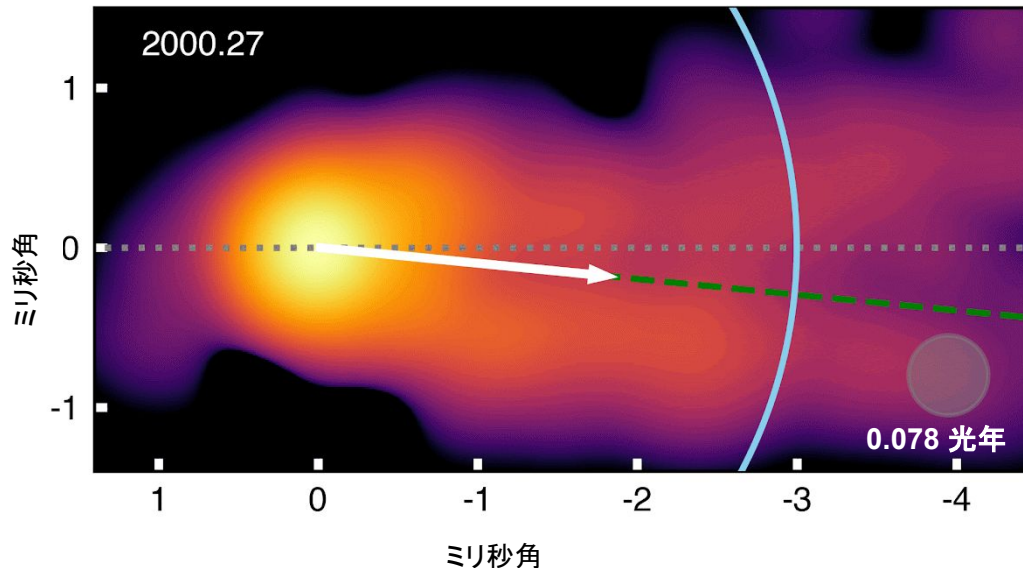
紀 基樹

ブラックホールとジェット歳差の動画の比較

EHTによるブラックホールの静止画
(2017年データ)



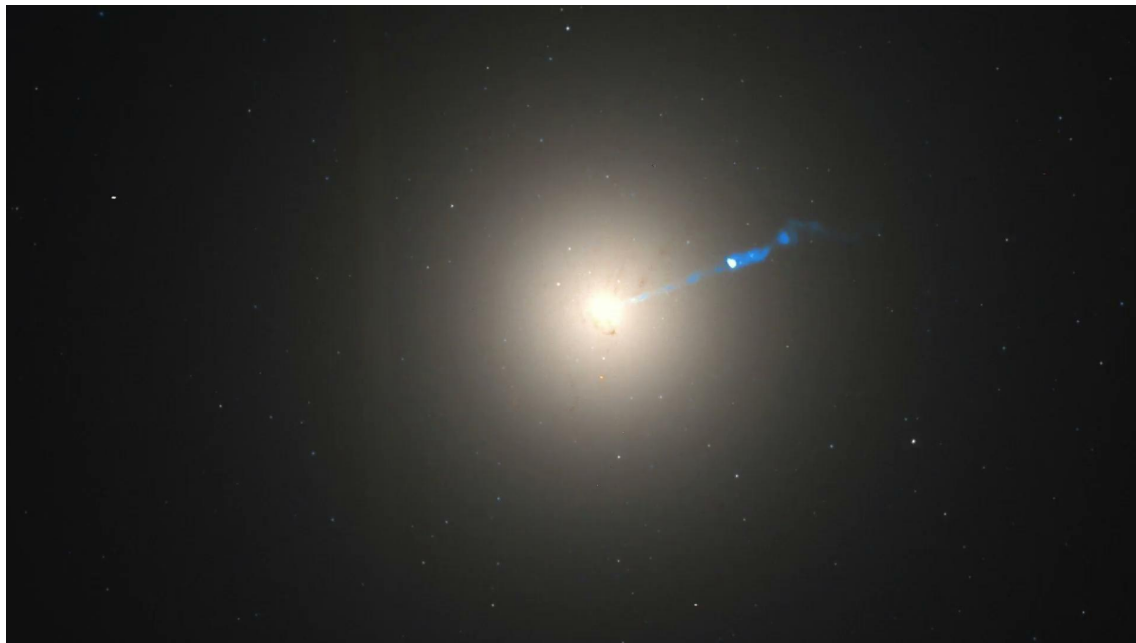
EAVNによるジェット歳差の動画
(2000 - 2022年データ)



- EHT コラボレーションも、動画を目指して2018年以降のM87観測データを鋭意解析中！
- 両者を比較し「ブラックホール自転速度」と「ジェット発生メカニズム」を解き明かす

まとめ

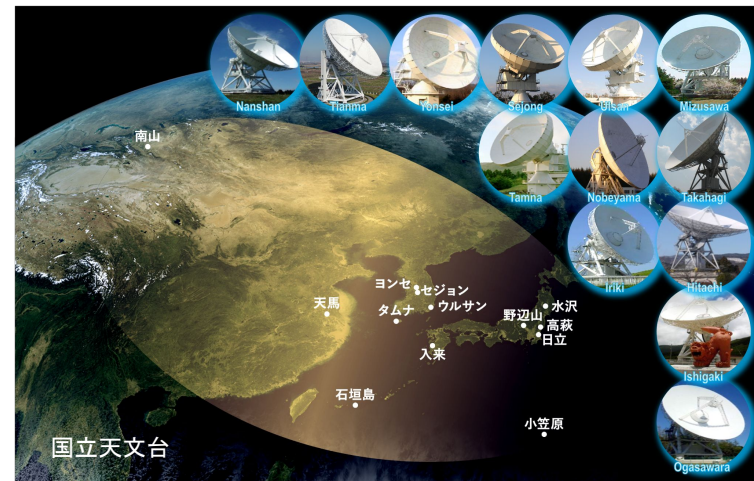
- EAVNなどを用いてM87ジェットの詳細な運動を長年にわたり観測
- ジェットが噴出する向きが約 11年周期で変化していることを発見
- 巨大ブラックホールが自転をしている証拠であり、ジェットの発生メカニズム解明にも大きく前進
- 今後はブラックホール動画とジェット動画の比較が重要



Credit: Cui et al. (2023), animation by Kazuhiro Hada

日本・日本人の主な貢献

- 研究統括・観測立案
 - 崔、秦、紀
- 望遠鏡の運用(日本から7台)、相関器の開発・運用
 - 秦、本間、米倉、廣田、澤田、高村、小山、他
- 観測データ解析・画像化
 - 崔、秦、新沼
- 理論・シミュレーション、スパコンの運用
 - 考察: 川島、水野、紀
 - コード開発: 高橋、大須賀

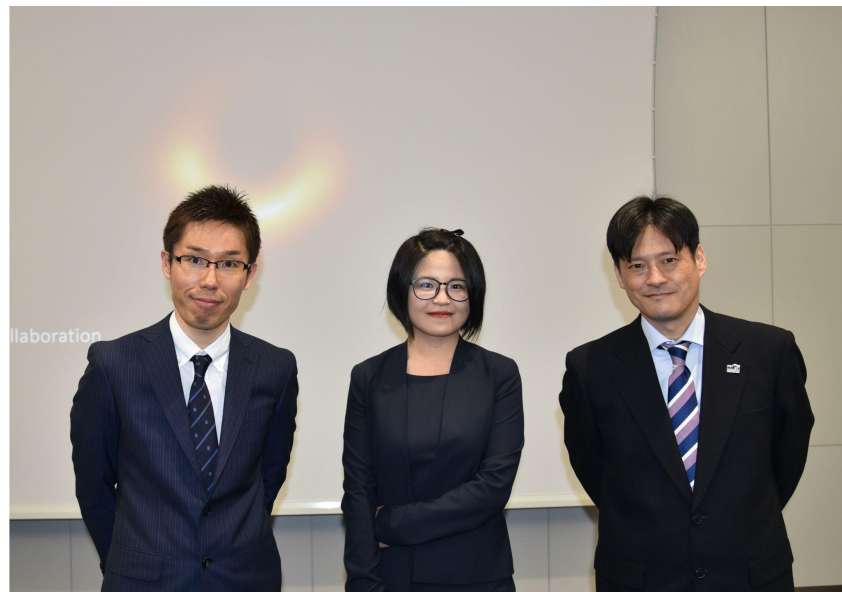


赤字は記者発表出席者

崔さんについて

- 大学院生(総合研究大学院大学)として、2017～2021年に国立天文台水沢で研究(指導教員 本間・秦)
- 本研究成果は崔さんの学位論文に基づいています
- 好きなアニメはスラムダンク

2019年4月のEHT記者発表にて



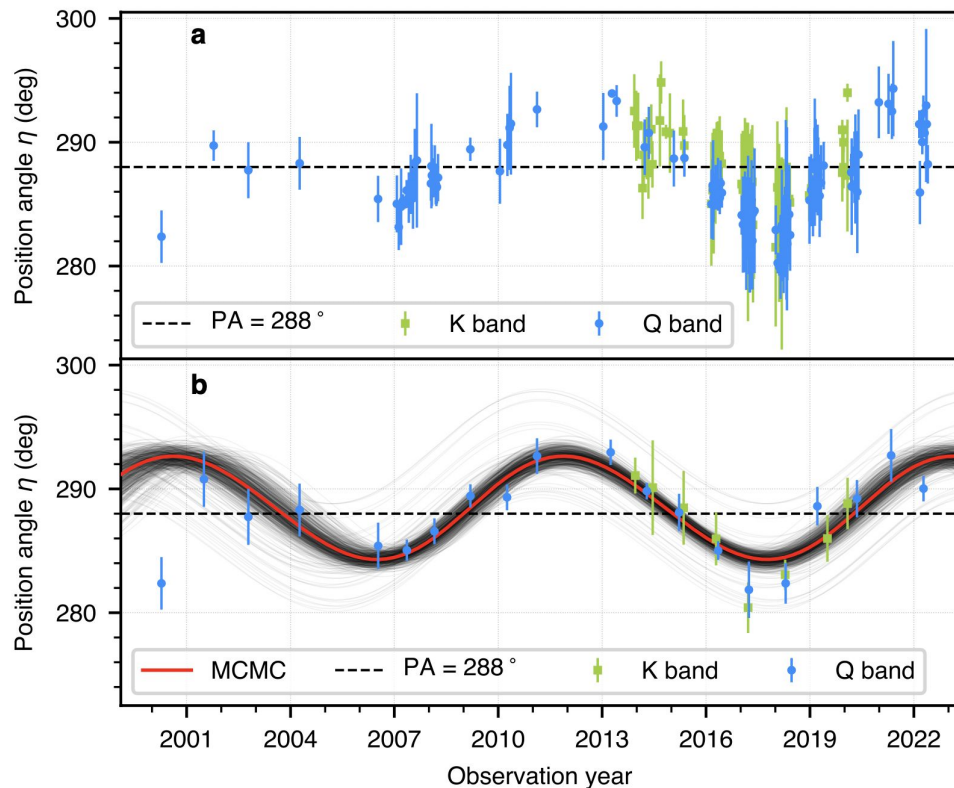
謝辞

この研究は、文部科学省/日本学術振興会科学研究費補助金 (No. 18H03721, 19H01943, 18KK0090, 21H01137, 21H04488, 22H00157, 18K13594, 19H01908, 19H01906, 18K03656, 19KK0081)、文部科学省スーパーコンピュータ「富岳」成果創出加速プログラム「シミュレーションとAIの融合で解明する宇宙の構造と進化」(JPMXP1020230406)、他、国際的な支援を受けて行われたものです。すべての支援機関については、論文謝辞をご覧ください。

また、本研究を支援していただいた全ての関係者・関係機関の皆さまに感謝申し上げます。

補足資料

ジェットの向きの変化 (詳細)



170個の測定結果を個別にプロットしたもの

測定結果を約1年ごとに平均したもの

青色のデータは波長7mm帯での観測
緑色のデータは波長13mm帯での観測

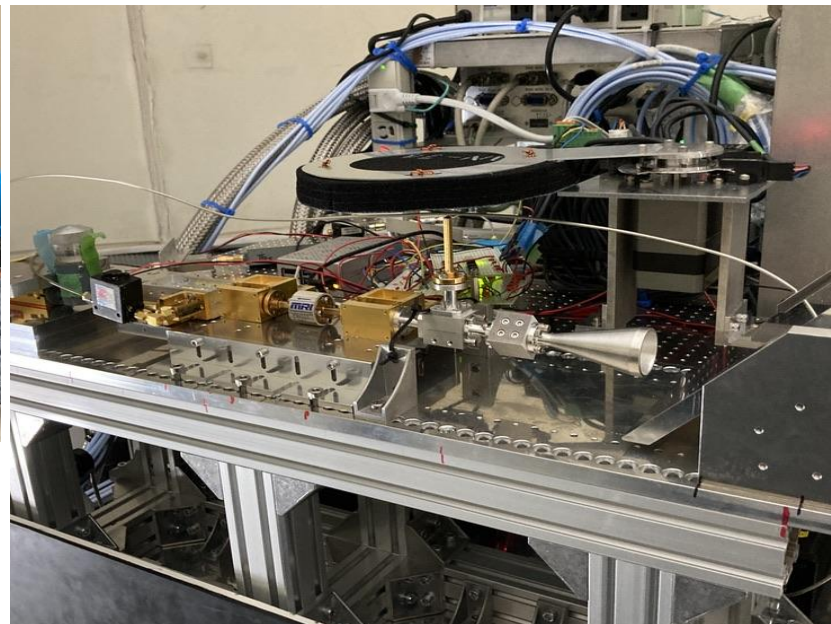
東アジアVLBI国際連携

2019年9月に茨城大学で開催されたEAVN国際会議にて



東アジアVLBIネットワークは東アジア・東南アジア地域の電波天文学研究者の国際協力によって運用されています。望遠鏡ネットワークの共同運用だけでなく、それを用いた様々なサイエンスでも国際合同チームを組織し、研究を推進しています。今回の研究成果もその1つです。

今後の展望2: 波長3.5mm帯での観測



今回の研究成果は主に波長7mm帯の観測に基づくものだったが、VERAでは波長がさらに短い3.5mm帯受信機を開発し、搭載試験を進めている

さらに高い解像度で、ジェットの更に根本領域や降着円盤が歳差運動する様子まで捉えたい

水沢局にて搭載試験中の3.5mm帯受信機
(大阪公立大学との共同開発)