

多波長同時観測でさぐるM87 巨大ブラックホールの活動性と周辺構造 ～地上・宇宙の望遠鏡が一致団結～

発表者

秦 和弘(国立天文台 水沢VLBI観測所)[水沢会場]:(全体概要、電波観測)

川島朋尚(東京大学 宇宙線研究所)[オンライン]:(理論・解釈、成果意義)

Daniel Mazin(東京大学 宇宙線研究所)[オンライン]:(ガンマ線観測)



Event Horizon Telescope

陪席者

本間 希樹、田崎 文得、小山 友明(国立天文台 水沢VLBI観測所)[水沢会場]

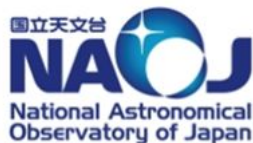
崔 玉竹(総合研究大学院大学)[水沢会場]

紀 基樹(工学院大学)、笹田真人(広島大学)[オンライン]

はじめに

- 本研究成果はEHT国際チームと世界の様々な多波長望遠鏡チームとの合同成果約200の研究機関)
- 本研究成果は The EHT Multi-wavelength Science Working Group et al. “*Broadband Multi-wavelength Properties of M87 during the 2017 Event Horizon Telescope Campaign*”として、米国の天体物理学専門誌『アストロフィジカル・ジャーナル・レターズ』オンライン版に本日掲載
- 記事解禁 日本時間 18:00
 - Event Horizon Telescope 公式ウェブサイト(英語)
 - 国立天文台、東大宇宙線研究所、他関係機関 ウェブサイト(日本語)
 - NASA ウェブサイト(英語)、ほか

国内の合同発表機関



Event Horizon Telescope

本研究の概要

- **背景**: 2019年4月、イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT) 国際チームは楕円銀河 M87 の中心にある **巨大ブラックホール (BH)** の撮影画像を公開 (成果発表済)
- **今回の内容**: EHT 観測が行われた時期 (2017年4月) に合わせて、**地上・宇宙にある様々な波長の望遠鏡** (電波、可視光線、紫外線、X線、ガンマ線) が **M87 の巨大BHを一斉に合同観測**。今回はEHTと膨大な多波長データを統合した研究成果を発表
- **結果**: 多波長データをまとめた結果、**EHT画像が得られた時期の巨大BHは非常に「おとなしい」活動状態**であることがわかった。また、**理論計算結果と比較**したところ、EHTで撮影された**リング状の構造とは異なる場所でガンマ線が生成**されている可能性が高いことがわかった
- **解釈・意義**: 巨大BHから噴出する**ジェットが複雑な内部構造を持つ**ことを示し、ジェットの形成や多彩な電磁波放射メカニズムの解明に手がかり
- 本研究はEHT国際チームと**19の多波長望遠鏡** (EHT含む) がタイアップした合同成果。**32の国と地域**から総勢**760名**の研究者が協力し、**ジェットを持つ巨大BHの観測としては天文学史上最大規模の合同観測**キャンペーン



研究の背景



ブラックホールとは

- 強い重力により光さえ脱出できない暗黒の天体
- アインシュタインの一般相対性理論から存在が预言される(1916年)
- ほぼ全ての銀河の中心には大質量のブラックホールがあると考えられてきた
- しかし、ブラックホールは非常にコンパクトゆえ、人類はその輪郭を直接画像に捉えたことはなかった

シミュレーションによる
ブラックホールシャドウの想像図



塩川穂高/CfA/Harvard



イベント・ホライズン・テレスコープ(EHT)プロジェクト

- 波長の短い電波で地球規模の VLBI観測を行い、極限の視力(300万)でブラックホールシャドウの撮影を目指す
- 世界13機関を中心に、300名超の研究者からなる国際協力プロジェクト
 - 日本も多岐にわたる貢献(望遠鏡運用、装置開発、観測立案、画像解析、理論)
- 2017年4月にアルマ望遠鏡を含む世界6箇所8台のネットワークで楕円銀河 M87や天の川銀河中心いて座 Aスターを観測



EHTによるBHシャドウ初撮影

- 2019年4月に成果公開
- 地球から5500万光年の距離にある楕円銀河M87の中心核をEHTで観測
- 直径約0.01光年のリング状構造を検出
- 太陽65億個分の質量を持つブラックホールから予言されるシャドウの形と一致
- ブラックホールの初めての視覚的証拠

EHT Collaboration

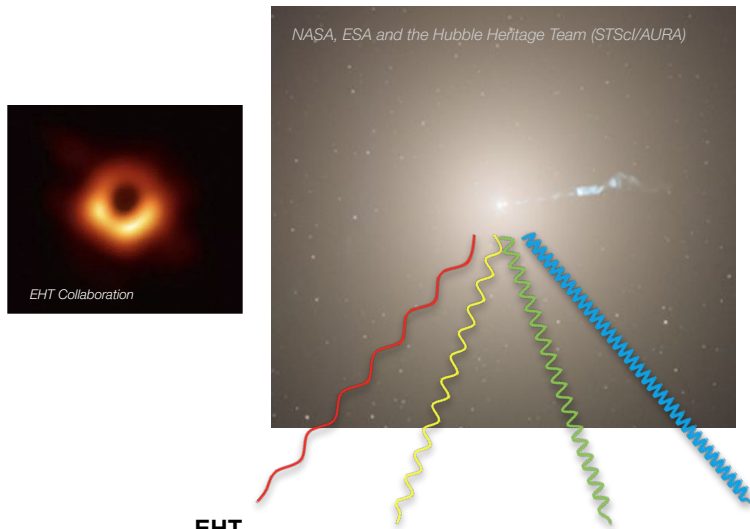
0.01光年

ハッブル宇宙望遠鏡 (可視光)

NASA, ESA and the Hubble Heritage Team
(STScI/AURA)



EHT観測だけでは様々な「宿題」が残った



- **M87は「活動銀河核」**

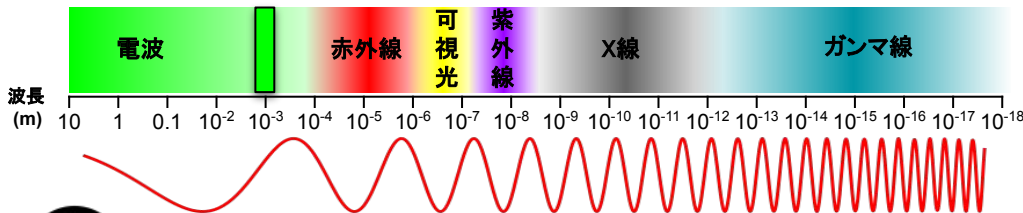
- 銀河全体に匹敵する光度が中心部 1光年以内から放射
- 電波～可視光線～ガンマ線まであらゆる波長の電磁波を放射し、激しく光度変動(フレア)することもある
- ジェットを噴出

- **EHT画像だけでは解決しなかったこと**

- BHの活動性は？活発だった？おとなしかった？
- BHとジェットや周辺ガスとのつながりは？
- ガンマ線などの高エネルギー放射は EHTで撮影した領域と同じ場所から来ているのか？異なる場所なのか？

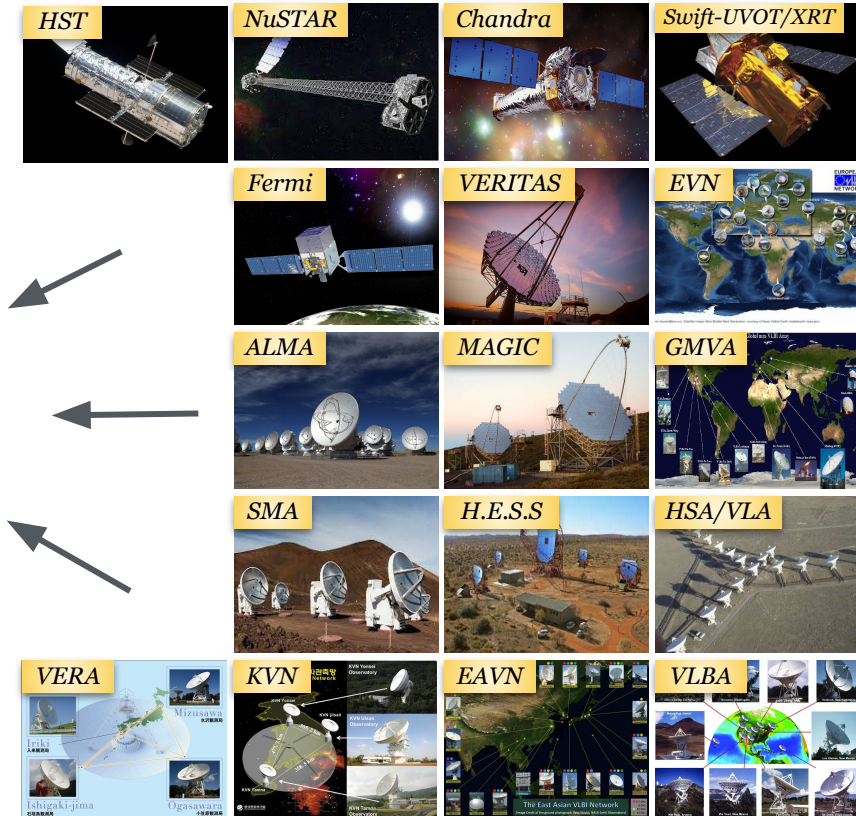


**EHT観測のタイミングに合わせて、
できるだけ「様々な波長の望遠鏡」で
「同時期に」中心核を観測する必要**



EHTとタイアップした多波長同時観測キャンペーン

- 2017年春、EHTを含む**地上・宇宙の計19の多波長望遠鏡が一致団結し、M87中心核を同時期に一斉に観測**
- ジェットを持つ巨大BHの観測としては**天文学史上最大規模の合同観測キャンペーン**



- 本研究の目的
 - EHTと多波長同時観測データを統合することで、巨大BHの活動性や周辺構造をより詳しく解き明す
 - 膨大なデータを世界中の研究者に公開し、更なる理論研究などに役立ててもらう



観測キャンペーンに参加した各望遠鏡の情報

望遠鏡名	望遠鏡の場所	波長	視力	観測日 (2017年)
欧州VLBI観測網 (EVN)	欧州 (一部米国・アジア含)	電波 (18 cm)	2万	5/9
高感度アレイ (HSA)	米国	電波 (1~4 cm)	13万	5/15,16,20
VERA	日本	電波 (1 cm)	5万	1月~5月の間で9晩
超長基線アレイ (VLBA)	米国	電波 (0.7~1 cm)	24万	5/5
東アジアVLBI観測網 (EAVN)	日本、韓国、中国	電波 (0.7~1 cm)	14万	1月~5月の間で22晩
韓国VLBI観測網 (KVN)	韓国	電波 (0.2~1 cm)	10万	4/19, 他6晩
グローバルミリ波VLBI観測網 (GMVA)	欧州、米国	電波 (3 mm)	90万	3/30
イベントホライズンテレスコープ (EHT)	欧州、米国、チリ等	電波 (1 mm)	300万	4/5,6,10,11
サブミリ波アレイ (SMA)	米国・ハワイ	電波 (1 mm)	10	4/5,6,10,11
アルマ望遠鏡 (ALMA)	チリ	電波 (1 mm)	60	4/5,6,10,11
ハッブル宇宙望遠鏡 (HST)	宇宙	可視光線	600	4/7,12,17
Swift-UVOT 宇宙望遠鏡	宇宙	可視光線, 紫外線	25	3/22~4/20の間で23晩
Swift-XRT 宇宙望遠鏡	宇宙	X線	1.7	3/22~4/20の間で12晩
Chandra 宇宙望遠鏡	宇宙	X線	200	4/11,14
NuSTAR 宇宙望遠鏡	宇宙	X線	1.3	4/11,14
Fermi 宇宙望遠鏡	宇宙	高エネルギーガンマ線 (GeV)	0.17	3/22~5/20の毎晩
H.E.S.S 望遠鏡	ナミビア	超高エネルギーガンマ線 (TeV)	0.17	3/28, 29, 4/1, 2
MAGIC 望遠鏡	スペイン・カナリア諸島	超高エネルギーガンマ線 (TeV)	0.46	3/22~4/20の間で18晩
VERITAS 望遠鏡	米国	超高エネルギーガンマ線 (TeV)	0.17	3/22~4/18の間で7晩



研究成果

- 全体的な多波長合同成果
- 日本が特に貢献した部分



ムービー



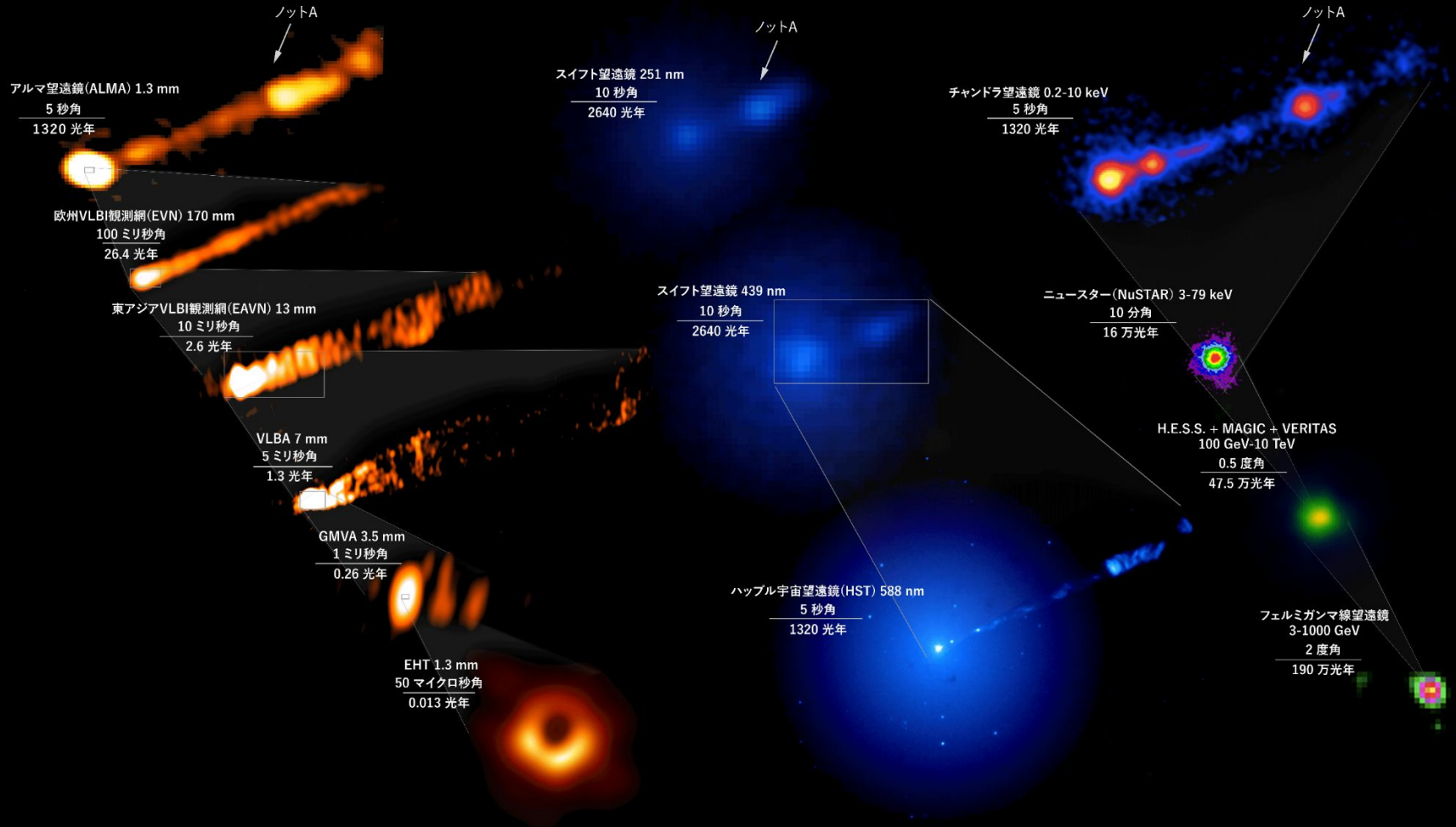
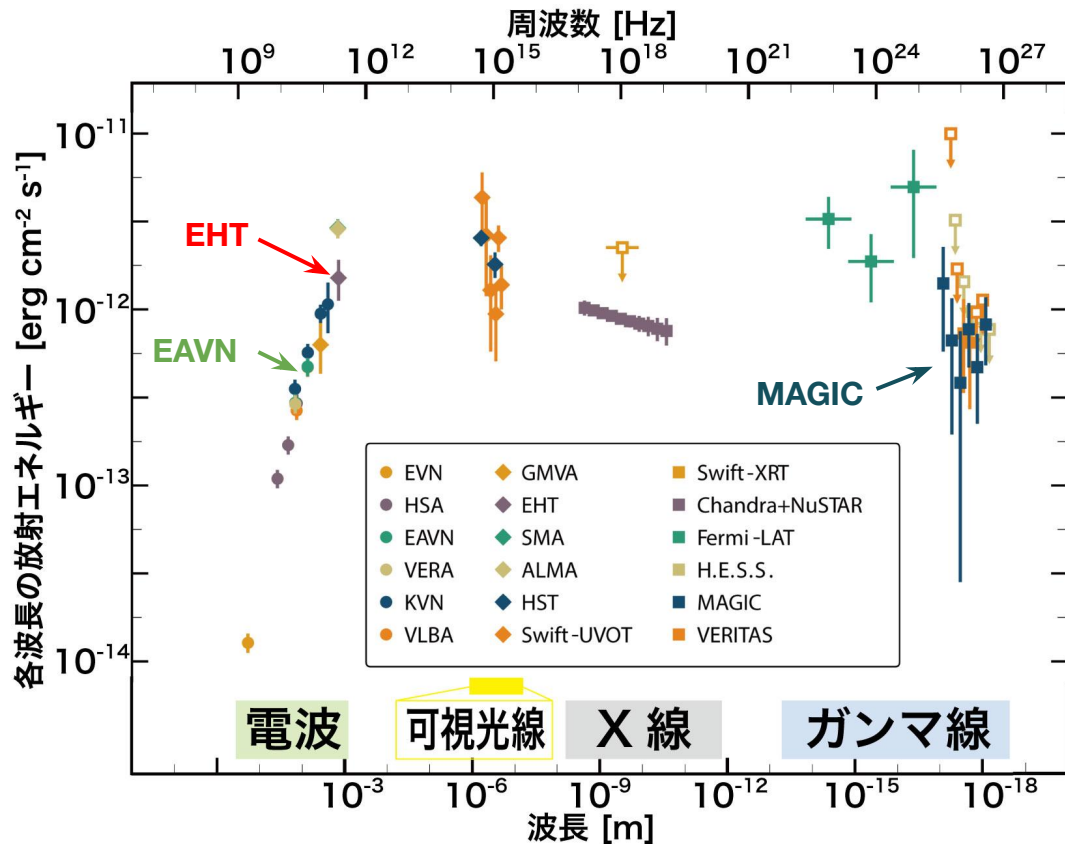


Image Credit: The EHT Multi-wavelength Science Working Group; the EHT Collaboration; ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); the EVN; the EAVN Collaboration; VLBA (NRAO); the GMVA; the Hubble Space Telescope; the Neil Gehrels Swift Observatory; the Chandra X-ray Observatory; the Nuclear Spectroscopic Telescope Array; the Fermi-LAT Collaboration; the H.E.S.S collaboration; the MAGIC collaboration; the VERITAS collaboration; NASA and ESA. Composition by J. C. Alga



中心部の放射エネルギースペクトル

- 各望遠鏡で得られた画像の中心部の明るさを測定し、波長ごとにまとめたもの
- **巨大ブラックホール近傍からの放射が、波長域18桁にわたって、同時期に測定できたのは今回が初めて**
- **電波～ガンマ線にいたる全波長帯で爆発現象などは見られず、非常におとなしい活動状態だった**
- この静穏期の放射エネルギースペクトルから新たに何がわかるか？
 - → 理論解釈のところで説明



日本からの主な貢献

研究全体統括: Markoff (蘭), Haggard (加), 秦 (日本)
(EHT 多波長サイエンス作業班 世話人)



VERA/EAVN 運用・分析
他電波観測データ分析



崔, 秦, 田崎,
本間, 小山 ほか

可視光線データ分析



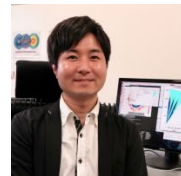
笹田

MAGIC M87観測
チーム統括

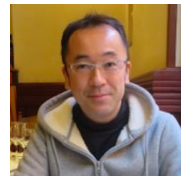


Mazin

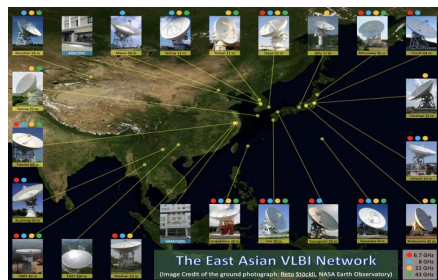
理論との比較・解釈



川島



紀



©EAVN



©NASA



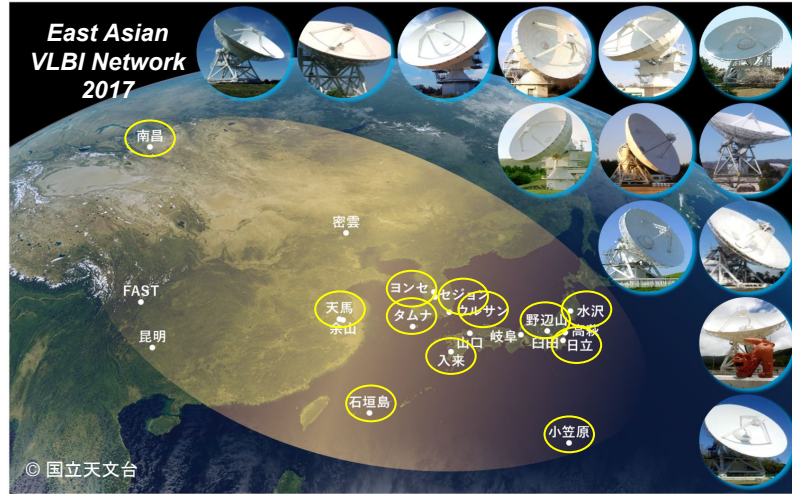
©MPIfP/R. Wagner



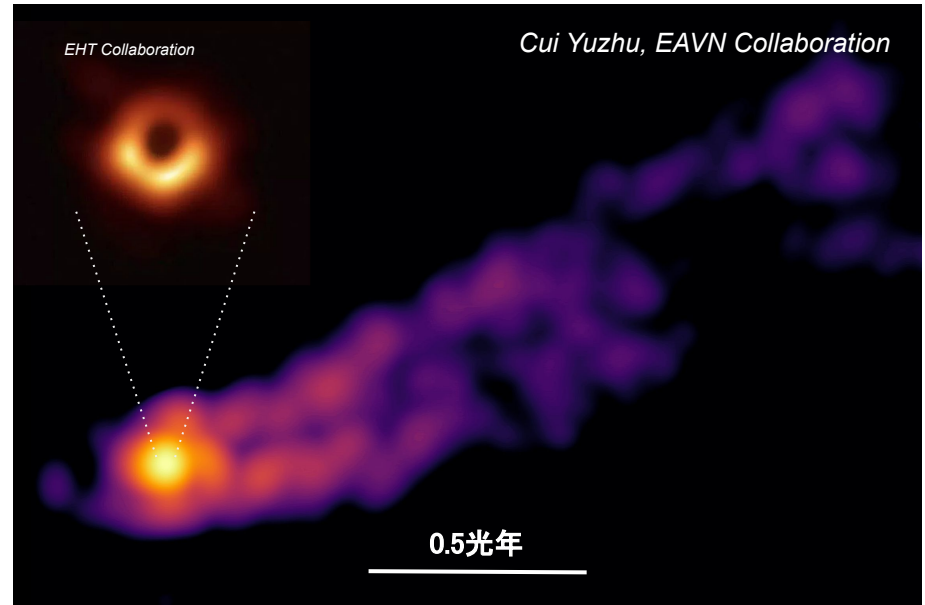
©国立天文台



東アジアVLBI(EAVN)電波観測による成果・役割



- 日本・韓国・中国から計**13局**参加 (1cm帯 & 7mm帯)
 - 最大基線長 **5100km** (小笠原 - ウルムチ)
- 2017年1~5月に計22晩
 - 計 **143.5時間** (記録データ量 **約600TB**)
- **巨大BHとジェットの繋がりを詳しく撮影**
 - 根元の明るさ、形状、方向、速度などを監視



- BH画像が得られた時期のジェットは強い噴出や爆発現象などは見られず、**穏やかな状態だった**
- ジェットの根元部分は**南側のほうが少し明るかった**。EHT画像で南側が明るいのも同じ傾向



Gamma-ray observations with MAGIC

- Two 17 m diameter Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes
- Operated by a team of ~150 scientists from 42 institutes from 12 countries
- MAGIC-I: since 2004; MAGIC-II: since 2009, start stereoscopic observations
- Energy range 50 GeV - over 50 TeV
- MAGIC monitors M87 since 15 years. Several in depth studies of γ -ray flares and quiescent emission
- EHT 2017 campaign: 27.2hr total exposure time after quality cuts
- MAGIC clearly detected M87 in quiescent flux state during the EHT 2017 campaign.
- **The MAGIC TeV flux measurement is fundamental to understand the origin of TeV γ -rays as explained in the interpretation part.**

Observatorio del Roque de los Muchachos
La Palma, Spain, 2200 m a.s.l.



Mazin, MAGIC PI of M87 campaign



MAGICによるガンマ線同時観測

- ・ 2台の直径17mの解像型大気チェレンコフ望遠鏡からなるシステム(スペイン・ラ・パルマ)
- ・ 12か国、42機関、150人規模の研究者が運用(マジン准教授ら日本の貢献が大)
- ・ MAGIC-I: 1台目、2004年から観測開始、MAGIC-II: 2台目、2009年からステレオ観測を開始
- ・ 検出可能な光子エネルギー: 50 GeV - 50 TeV以上
- ・ MAGICは15年にわたりモニタ観測を実施。フレア時や静穏期のガンマ線放射の研究に貢献
- ・ EHT2017キャンペーンの間に合計27.2時間分の観測データを取得、静穏期ガンマ線放射を高い有意度で検出
- ・ **この検出は、ガンマ線源がブラックホール近傍か解釈する上で貴重なデータ**

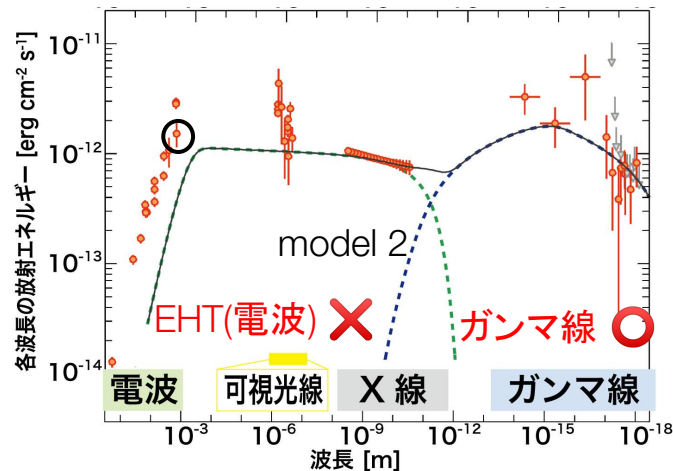
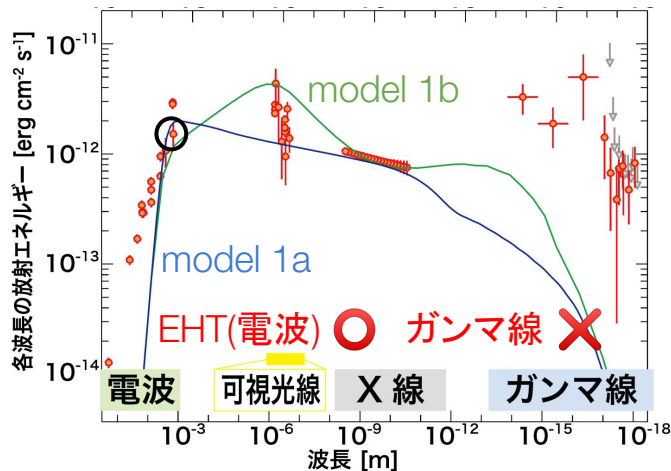
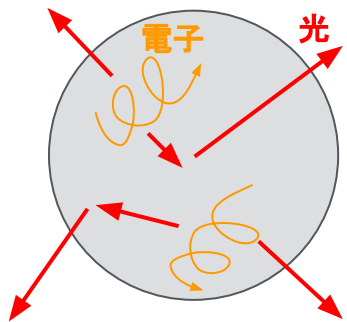
Observatorio del Roque de los Muchachos
La Palma, Spain, 2200 m a.s.l.



ダニエル・マジン(東大宇宙線研)
MAGICによる M87キャンペーン観測の責任者



放射エネルギースペクトルの理論的解釈



- 従来の考え方: ガンマ線は電波と同じ領域で放射されると考えるのが主流。
今回の同時観測データを元に、この仮説を検証。

- シンプルな理論仮説に基づき、3人の理論研究者[紀(工学院大)・川島(東大宇宙線研)・ルッキーニ(アムステルダム大)]で独立に仮説を立て計算を実施。 [model 1bではRAIKOUコード(※)を用いて国立天文台水沢のアテルイで計算実施]

- EHTで撮影されたリング状の構造とは異なる場所でガンマ線が生成されている可能性が高いことがわかった。



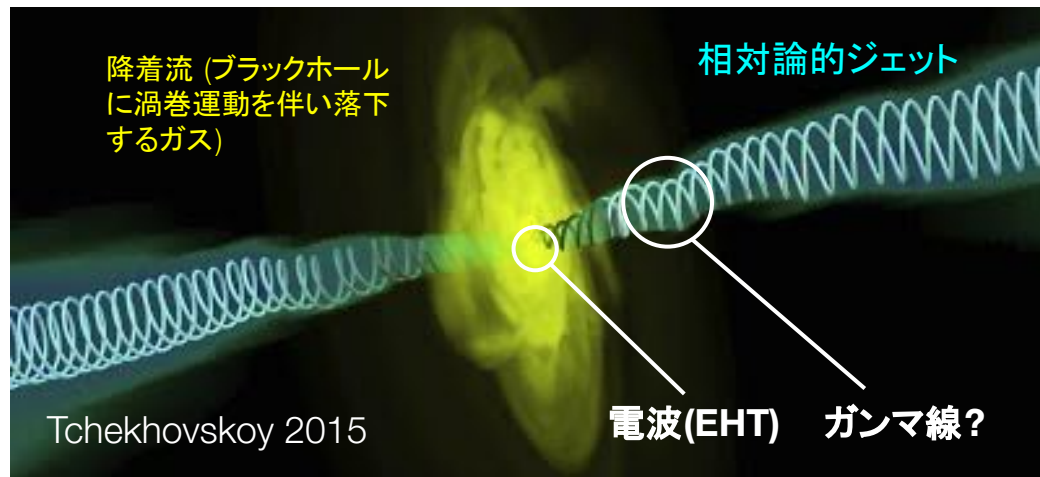
(※) RAIKOU(来光)コード:「富岳」での計算を目指して開発された一般相対論的な光の伝搬を解く数値計算コード



本成果の意義・インパクト

- 20年以上にわたる相対論的ジェットでの電波・ガンマ線放射の研究に新たな知見。
- 今後、ブラックホール・シャドウおよびジェットからの放射、これら両方の理解を目指した現実的な理論モデル(電子・陽子・磁場の分布がキーワード)の構築への助けとなるであろう。
- 相対論的ジェットの形成機構はジェット発見以来100年経った現在も未解明な重要問題。ブラックホール近傍でガンマ線が放射されるかで、モデルの取捨選択が期待できる。

従来: 電波放射領域 = ガンマ線放射領域
今回: 電波放射領域 \neq ガンマ線放射領域
将来: 大規模数値シミュレーションも用いた現実的モデルを構築し、観測と理論の詳細比較による包括的理解へ

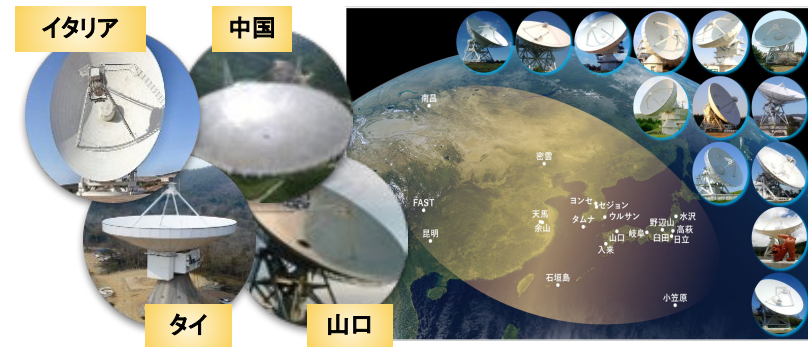


今後の展望



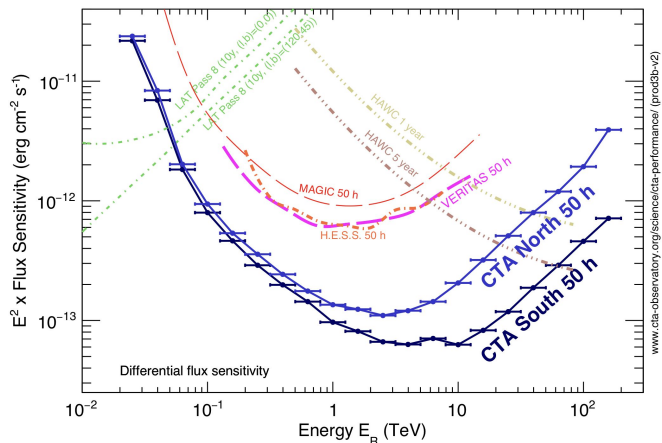
2021年からEHT観測キャンペーン再開

- 2018年以来、3年ぶりにEHT観測が再開。**先週末～来週頭にかけて現在EHT観測が行われている真っ只中**
- EAVNやMAGICを含む多波長望遠鏡も一斉にM87を観測中。今回は広島大Kanata望遠鏡など**更に多くの望遠鏡が参加**
- **EHTはネットワーク拡張**。リングの周りに広がるガスも撮影できる見込み。多波長データとより精密な比較が可能に
- 2017, 2018, 2021, 来年...の多波長データを今後も蓄積し、**巨大BHが激しく変動する姿**や、多波長放射メカニズムを解き明かしていく
- **東アジアVLBIネットワークも拡張中**。今後更に高品質なジェットの撮影を行い、EHTのBH画像と組合せることでジェットの形成メカニズムを突き止める

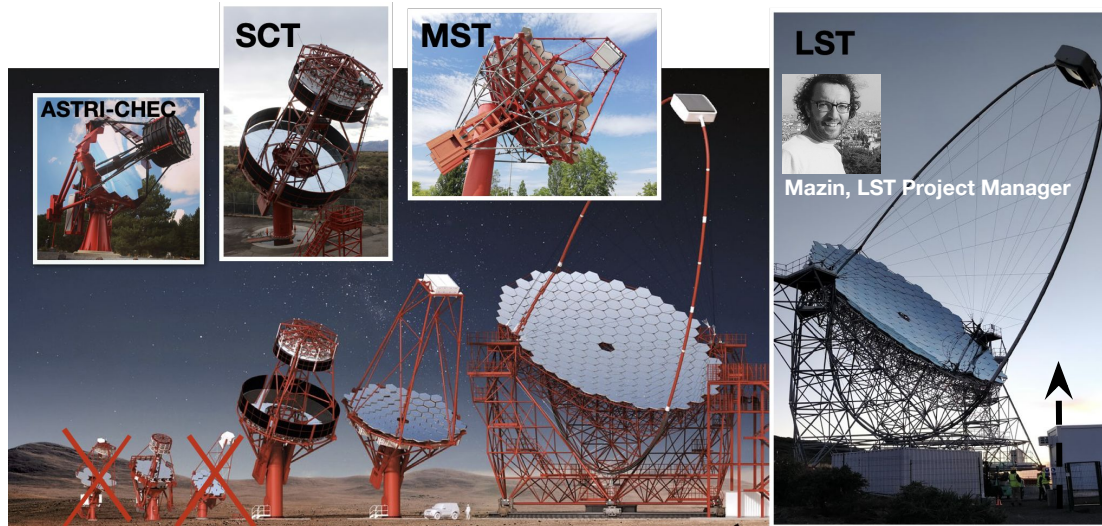


Future prospects of gamma-ray observations

Sensitivity of CTA compared to current telescopes



3 types of CTA telescopes: LST, MST and SST

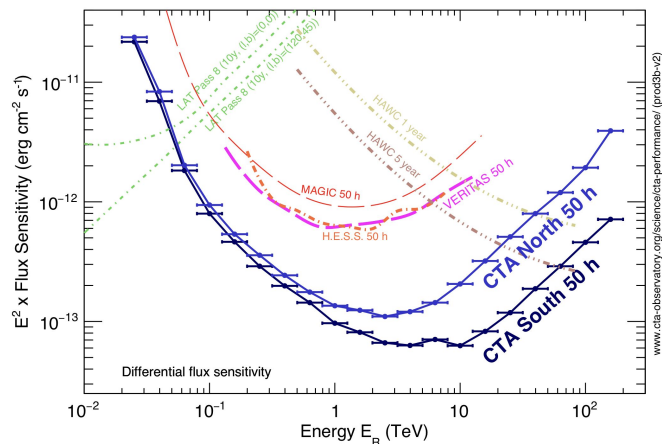


- Cherenkov Telescope Array (CTA) will be γ -ray observatory on two sites: La Palma (Spain) and Paranal (Chile). Open data access and run proposals from scientific community
- CTA will consist of about 100 telescopes and have an order of magnitude better performance than the current Cherenkov telescopes
- Energy range covered: 20 GeV - 300 TeV
- Important for M87: the angular resolution will be improved by a factor of 2, better localization of γ -ray signal
- First LST of CTA is already in La Palma, in commissioning phase since 2018, lead by ICRR (Japan)

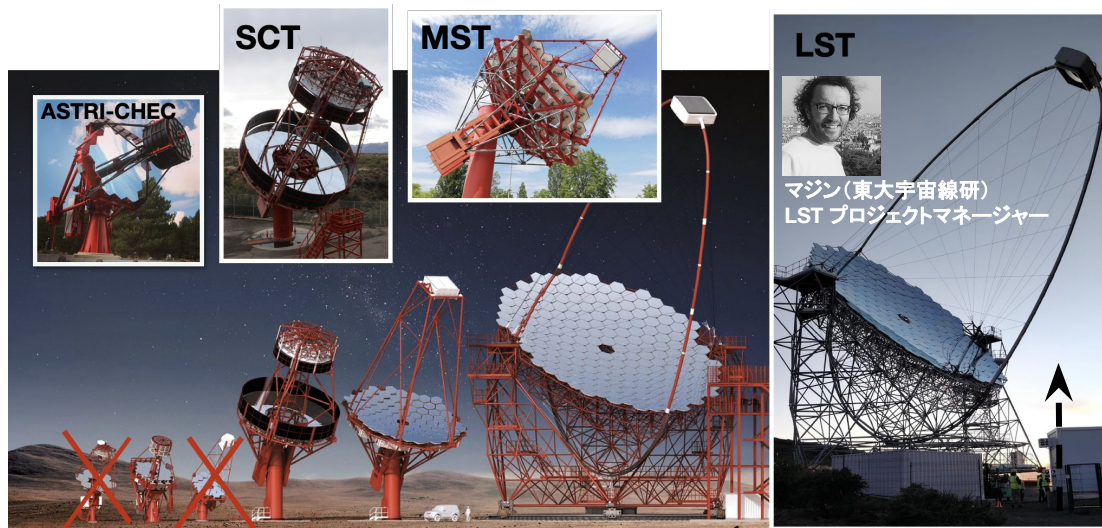


ガンマ線観測の今後: CTA

現在建設中のCTAの感度



大中小3種類の望遠鏡: LST, MST and SST

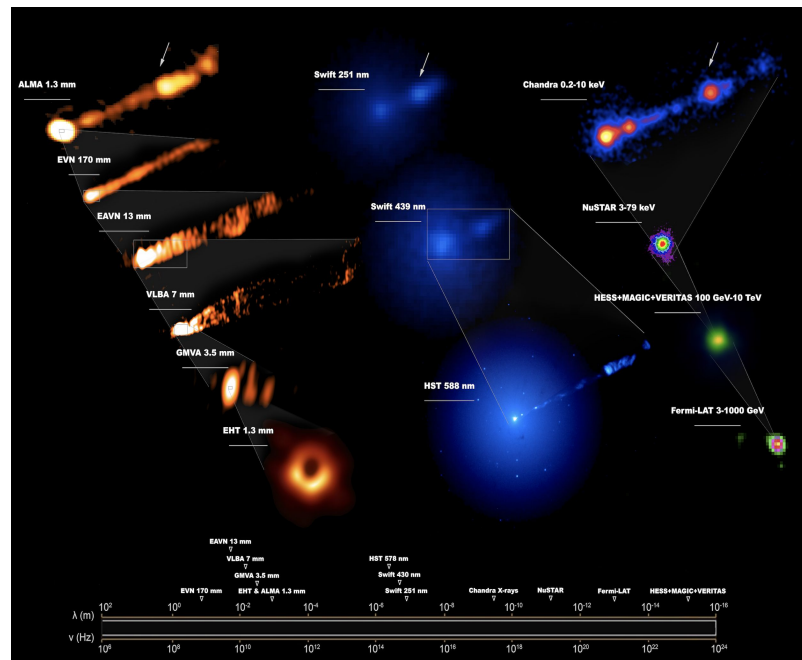


- Cherenkov Telescope Array (CTA) はスペインのラ・パルマとチリのパラナルに展開される予定の望遠鏡群。研究者コミュニティに公開され、自由にデータを取得したり、観測提案ができる。
- 約100基の望遠鏡を並べ、現在運用されている地上チェレンコフ望遠鏡よりも 1桁良い感度で観測ができる。
- 検出可能なエネルギー範囲: 20 GeV - 300 TeV
- 角度分解能が2倍良くなり、M87のガンマ線放射領域を特定するのに有用
- 日本の東大宇宙線研主導により、すでに初号機が 2018年からラ・パルマで初期運用が開始されている



まとめ

- 巨大BHを撮影した2017年4月のEHT観測に合わせ、世界中の多波長望遠鏡が一斉にM87を観測。19の望遠鏡、18桁の波長域に渡る、巨大BHとしては過去最大規模の合同観測
- BH画像が得られた時期のM87は、非常におとなしい状態だった。また理論計算結果と多波長データを比較。ガンマ線はHTで撮影された領域と異なる場所で発生
- 巨大BHジェットの生成や、電磁放射メカニズムの研究に新たな知見
- 日本からは研究全体統括、EAVN電波観測、MAGICガンマ線観測、可視光線データ解析、理論モデリングなどで貢献
- **BH画像と膨大な多波長データを組合せた研究の第一歩**。EHT、多波長望遠鏡ともに今後も性能アップグレードし、合同観測を続けていく。



補足資料

Supplementary slides

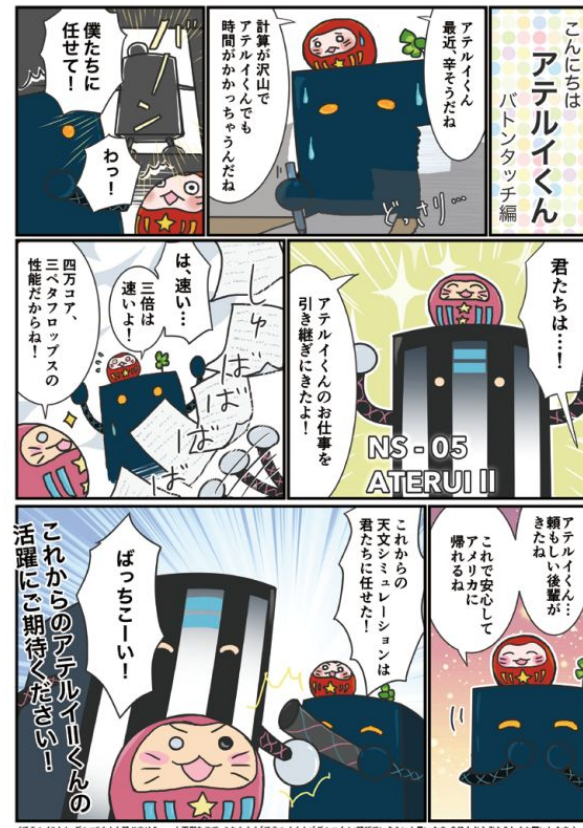


バックアップ (アテルイII)



Credit:NAOJ

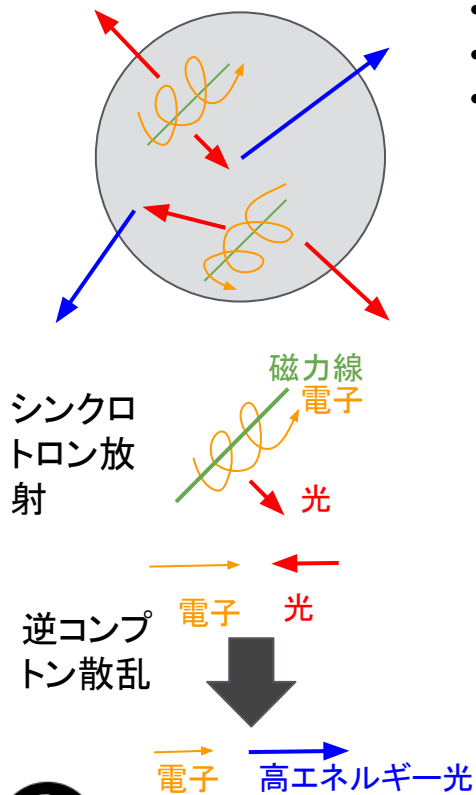
- 2018年6月に本格稼働を始めた天文学専用のスーパーコンピュータ Cray XC50 (スカラ型並列計算機)
- 所在地: 国立天文台水沢キャンパス
- 主な製造メーカー: クレイ・ジャパン・インク (HPE?)
- 理論演算性能: 3.087Pflops



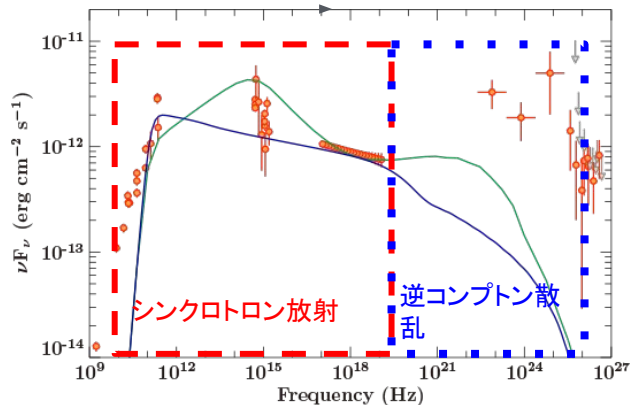
(アテルイくん、アテルイくんと呼ぶのはちょっと面倒なので、これから「アテルイくん」「アテルイくん」呼びたいと思います。今後もどうぞよろしくお願ひします。)



バックアップ(理論モデル)



- ガスの空間分布: シンプルな理論モデル (一様等方な放射ガス球)
- 非熱的電子 (通常的气体中と異なるエネルギースペクトルを持つ電子)のみ考える
- 放射過程: シンクロトロン放射/吸収 + 逆コンプトン散乱

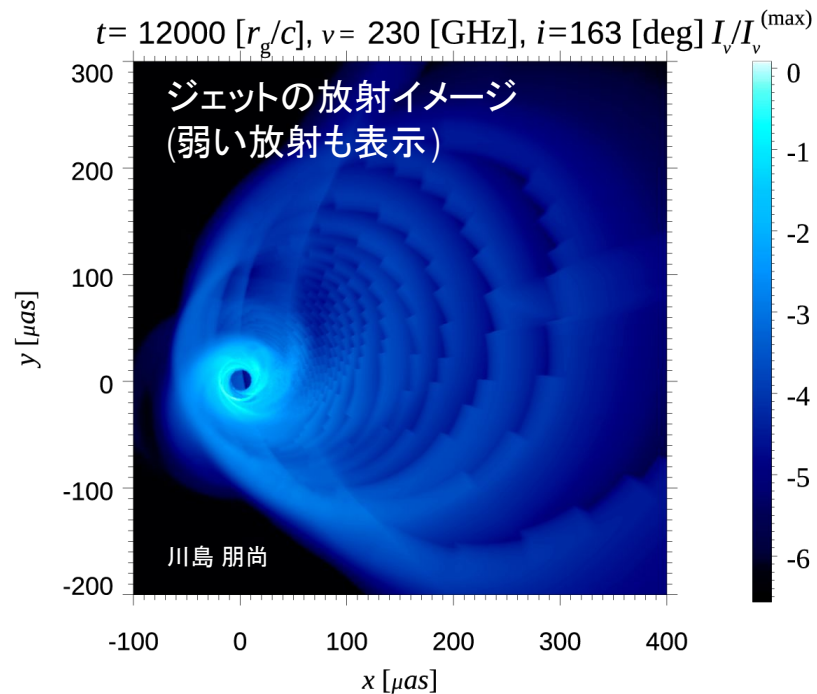
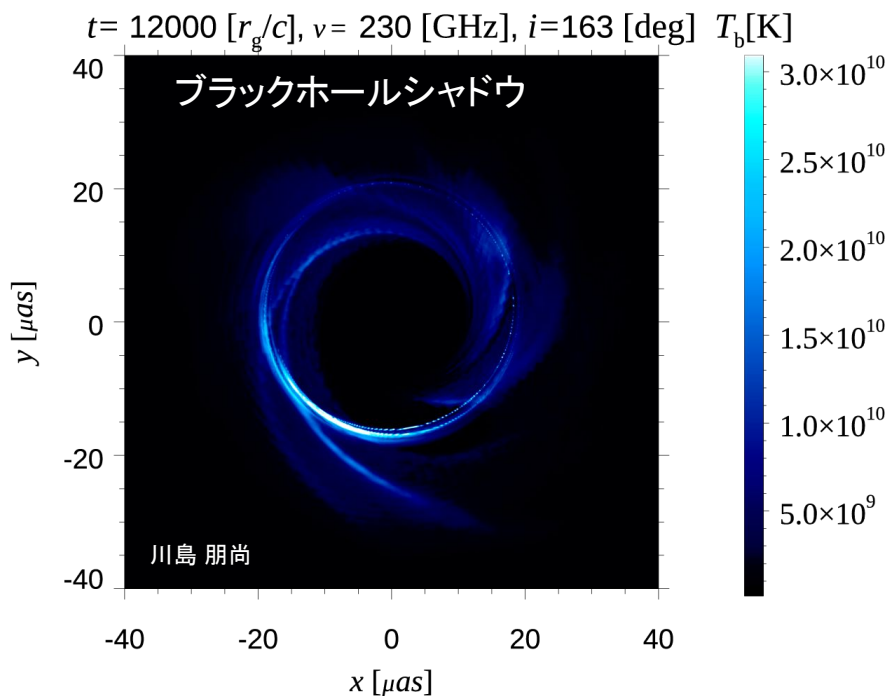


- シンクロトロン放射: 電子のような帯電粒子が磁場の周りを旋回運動することで出される放射。今回の場合、主に電波 - 可視光線・X線で明るくなる。
- 逆コンプトン散乱: 電子のような帯電粒子による光の散乱。光が帯電粒子からエネルギーを受け取り、高エネルギー光になる。今回の場合、主に X線・ガンマ線で明るくなる。



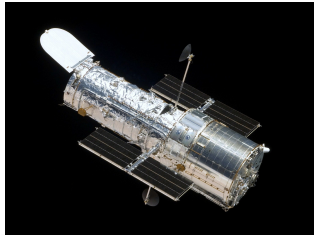
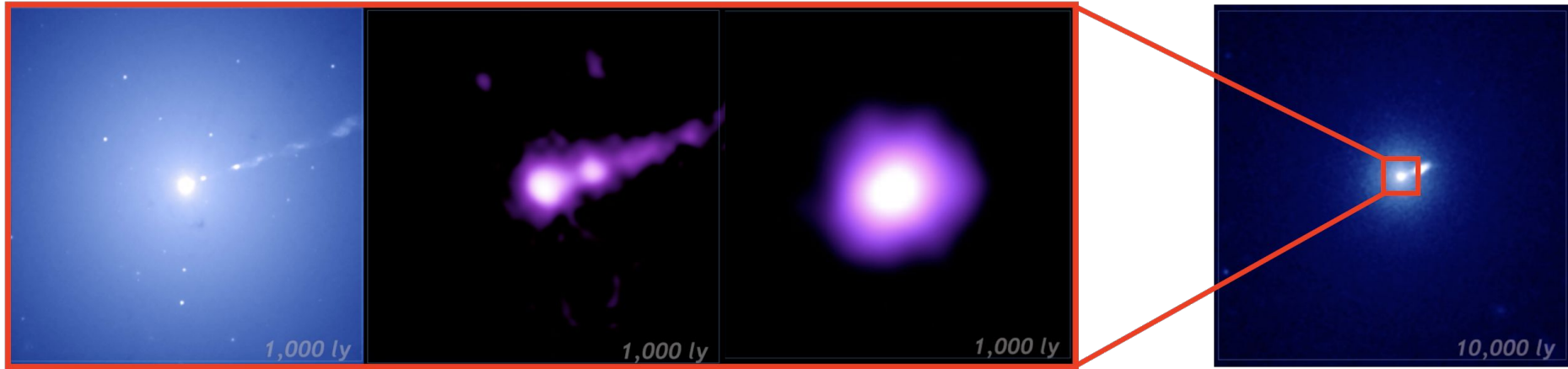
数値シミュレーションによるM87の理論イメージ

- 「富岳」でのシミュレーションに向けて開発されてきた一般相対論的放射磁気流体コード UWABAMI (駒澤大・高橋博之氏開発)と一般相対論的放射輸送コード RAIKOU(東大宇宙線研・川島開発)で計算した強磁場を伴う相対論的ジェットイメージ。(ジェットのイメージは次世代 EHTで観測が期待。)
- アテルイIIで大規模シミュレーションを実施中。富岳でのより大規模なシミュレーションも開始した。
- 電波からガンマ線までのスペクトル計算も実行中。

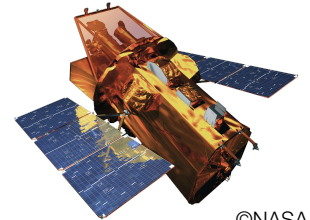
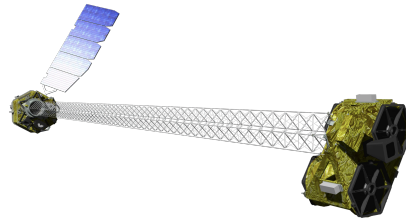
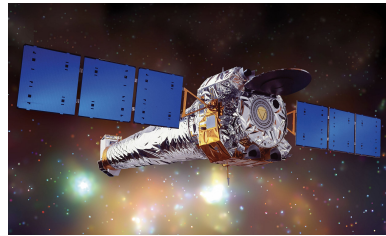


可視光線(及びX線)データの役割

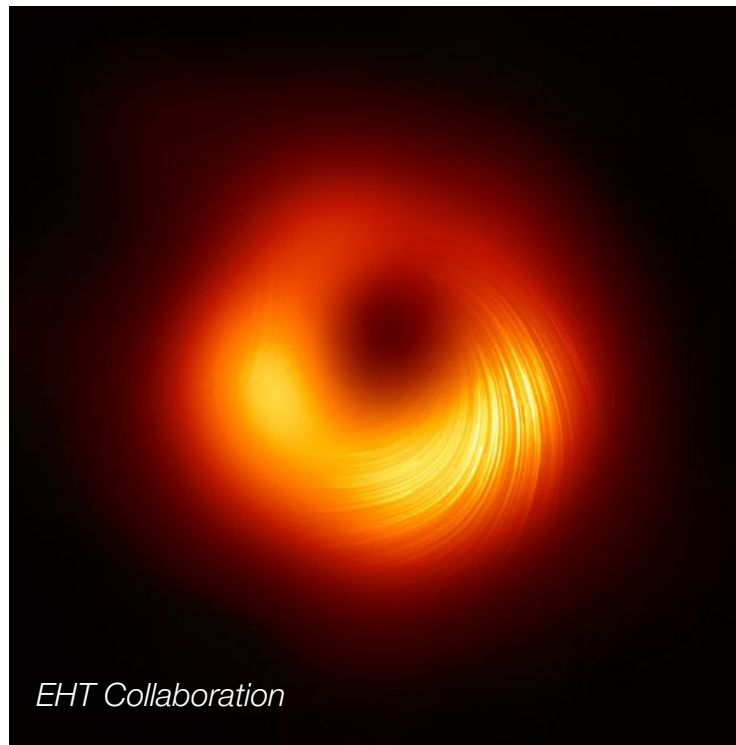
4つの衛星で同時に観測することで電波からガンマ線までをつないだ



Event Horizon Telescope



つい先月、偏光画像も公開



- 9ページ目 望遠鏡画像クレジット一覧

- EVN: Paul Boven/JIVE
- HSA/VLA: NRAO
- VLBA: Image courtesy of NRAO/AUI and Earth image courtesy of the SeaWiFS Project
NASA/GSFC and ORBIMAGE
- VERA: 国立天文台
- EAVN: 国立天文台
- KVN: 韓国天文研究院
- GMVA: MPIfR
- EHT: NRAO/AUI/NSF
- ALMA: ESO/NAOJ/NRAO
- SMA: CfA/Harvard
- HST: HST/NASA/ESA
- Swift-UVOT/XRT: NASA
- Chandra: NASA/CXC
- NuSTAR: NASA/JPL
- Fermi: NASA
- H.E.S.S: H.E.S.S Collaboration, Clementina Media
- MAGIC: MPIfP/R.Wagner
- VERITAS: CfA

ムービーのクレジット

Credit: The EHT Multi-wavelength Science Working Group; the EHT Collaboration; ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); the EVN; the EAVN Collaboration; VLBA (NRAO); the GMVA; the Hubble Space Telescope; the Neil Gehrels Swift Observatory; the Chandra X-ray Observatory; the Nuclear Spectroscopic Telescope Array; the Fermi-LAT Collaboration; the H.E.S.S collaboration; the MAGIC collaboration; the VERITAS collaboration; NASA, ESA and ESO; NASA/GSFC/SVS/M.Subbarao & NASA/CXC/SAO/A.Jubett.

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(18KK0090、JP18K13594、JP18K03656、JP18H03721、18K03709、18H01245、25120007、JP17J08829、JP19H01943、JP19H01908、JP19H01906、JP19K14761)、自然科学研究機構、東レ科学振興会、三菱財団、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム、ポスト「京」重点課題「宇宙の基本法則と進化の解明」他の支援を受けて行われました。すべての支援機関については、論文謝辞をご覧ください。

