

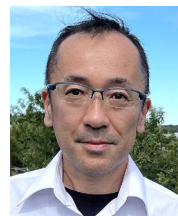
多波長同時観測で探る M87巨大ブラックホール



泰



笹田



紀

泰 和 弘¹・笹田 真人²・紀 基 樹³

〈¹ 国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢星が丘町 2-12〉

〈¹ 総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈² 広島大学 宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市東広島市鏡山 1-3-1〉

〈³ 工学院大学 学習支援センター 〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1〉

〈³ 国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ¹ kazuhiro.hada@nao.ac.jp, ² sasadam@hiroshima-u.ac.jp, ³ motoki.kino@nao.ac.jp

Event Horizon Telescope (EHT) によって撮影された楕円銀河M87中心核の画像はブラックホール (BH) 存在の視覚的証拠を示すとともに、活動銀河核の巨大BHパラダイムに決定打をもたらした。実はこの観測が行われた2017年春、EHTとともに地上・宇宙にある電波・可視光・紫外線・X線・ガンマ線望遠鏡が協力し、M87の大規模な多波長合同観測キャンペーンも行われていた。本キャンペーンの狙いは、BH撮影結果と同時期に得られた多波長データを結びつけることで、巨大BHの活動状態や相対論的ジェット・高エネルギー放射との関連をより詳しく明らかにすることであった。本稿ではその研究成果について紹介する。

1. 背 景

2019年4月、Event Horizon Telescope (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) シャドウの撮影画像を公開した [1-6]。中心部に直径約0.01光年のリング状構造 (光子リング) が検出され、太陽65億個分の質量を持った巨大BHが作り出す影の構造と一致した。本成果はBHの視覚的証拠を初めて捉えるとともに、銀河の中心には巨大なBHが存在するという長年のパラダイムに決定打を与える画期的な成果となった*1。また2021年3月には光子リングに付随する偏光画像が新たに公開され、

BH周辺の詳しい磁力線構造まで明らかになりつつある [11] (こちらの詳細は浅田圭一氏・水野陽介氏による姉妹記事を参照されたい)。このようにEHT観測の進展により、BH天文学は新たな時代の扉が開かれた。

一方でEHT観測のみでM87や巨大BHに関するすべてを理解するのは難しい。M87中心核はいわゆる「活動銀河核」であり、銀河全体に匹敵する光度が中心部1光年以内の非常に狭い領域から放射されている。電磁放射は電波・可視光・X線・ガンマ線まであらゆる波長域にわたり、激しく変動 (フレア) することもある。さらにはジェットと呼ばれる超高速の噴出流が中心核から

*1 詳しい日本語の解説は当時の天文月報速報記事 [7-10] を参照されたい。

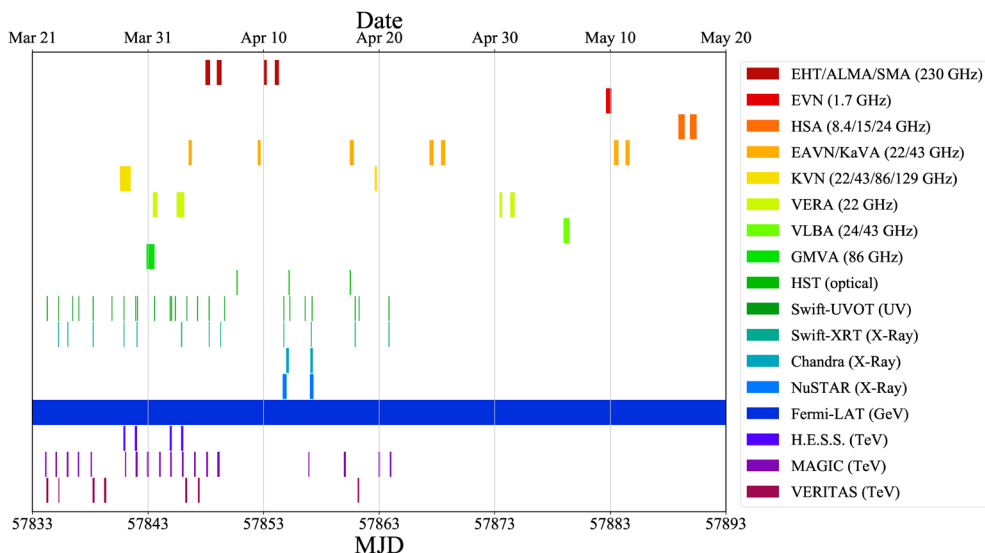


図1 2017年春に行われたM87多波長観測キャンペーンの参加望遠鏡と観測日時（横軸は上側がグレゴリオ暦，下側が修正ユリウス日 (MJD))。最上段がEHT観測が行われた4月5, 6, 10, 11日を表す。カラーの図についてはWeb版を参照されたい。

5000光年にもわたって観測されている。それゆえEHTが捉えたものは活動銀河核が示す多彩な特徴の一部に過ぎず、例えば以下のような問いが未解決の宿題として残されていた。

- EHT撮影が行われた2017年当時のM87巨大BHの活動性はどうかだったのか？（活発だった？ それともおとなしかった？）
- EHTで撮影されたリング状構造とジェットや降着円盤など周辺ガスとのつながりはどうなっているのか？
- ガンマ線などの高エネルギー放射はEHTで撮影された電波放射領域と同じ場所で生成されているのか？ あるいは異なる場所に起因するのか？

こうした広範囲の現象・謎に取り組むことで、巨大BHや活動銀河核の多様な性質をより深く理解することができる。そのためには、EHT観測のタイミングに合わせて、中心核をできるだけ様々な波長の望遠鏡と合同で詳しく調べる必要があった。

2. M87多波長合同観測キャンペーン

そこでEHTチームは2017年4月のEHT観測に合わせ、世界中の多波長望遠鏡パートナーと連携して大規模な多波長合同観測キャンペーンを実施した [12]。本キャンペーンはEHT国際チームの中の「多波長サイエンス作業班 (Multi-wavelength Science Working Group, 以下MWL-WG)」によってコーディネートされ、筆者 (秦) も世話人の一人として活動している。MWL-WGはEHTの内部メンバーと多波長望遠鏡からの外部コラボレータで構成されており、われわれは2017年の観測が始まる前から入念に合同観測の準備を進めてきた。また、EHT観測が始まった最中もメールやSlackなどを用いてリアルタイムで各望遠鏡の観測状況を情報共有し、できるだけ多くの望遠鏡で同時期に観測が行われるように努めた。図1に実際に行われた多波長キャンペーンの参加望遠鏡と観測スロットをまとめたチャートを示す。2017年3月から5月にかけて、電波（センチ波，ミリ波），可視光，紫外線，X線，ガン

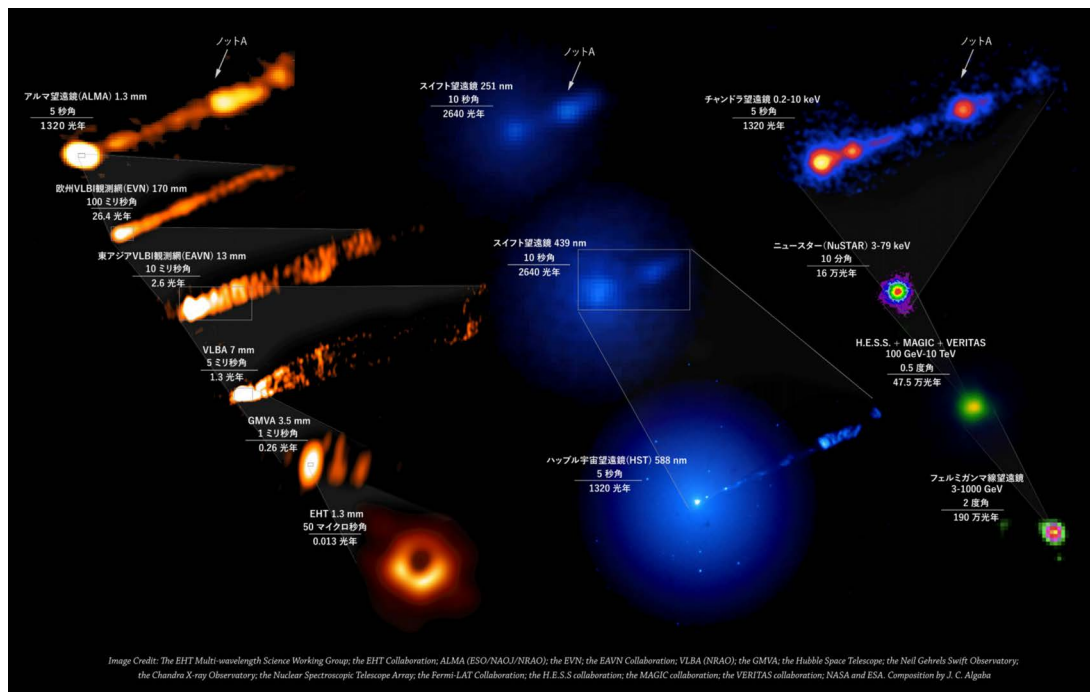


図2 2017年春の観測キャンペーンによって得られたM87の多波長マップ。左の列が電波（ALMAおよびVLBI）で得られた画像，中央の列が可視光および紫外線による画像，右の列がX線およびガンマ線で得られた画像である。望遠鏡により解像度や視野が異なるため，撮影される空間スケールも様々である。ALMA・可視光・紫外線・X線画像是5000光年スケールのジェットまで撮影し，解像度の高いVLBI観測ではジェットの根元付近数光年以内からブラックホールまでを捉えている。ガンマ線望遠鏡は解像度が不高いため，点源として撮影されている。カラーの図についてはWeb版を参照されたい。

マ線に至る計19の多波長望遠鏡群が，地上および宇宙から寄ってたかってM87を観測した様子がおわかりいただけるかと思う。ジェットを持つ巨大BHとしては天文観測史上最大規模のキャンペーンとなった。

本観測キャンペーンには日本からも様々な貢献があった。センチ波帯では，VERAや野辺山・日立・鹿島局を含む東アジアVLBIネットワーク（EAVN）がBHから噴出するジェットを詳しく撮影した。可視光帯では，ハッブル宇宙望遠鏡のデータ解析を筆者（笹田）が担当した。TeVガンマ線帯では，東京大学宇宙線研究所（宇宙線研）のダニエル・マジン氏を中心としてMAGIC望遠鏡による高頻度なモ

ニター観測が行われた。さらに観測結果の理論的解釈において，アテルイII*²等を用いた放射理論モデルとの比較が筆者（紀）および宇宙線研の川島朋尚氏を中心として進められた。

3. 観測結果

3.1 多波長マップと電波帯の結果

それでは観測結果を見ていこう。まず図2に観測キャンペーンによって得られた様々な波長でのM87画像を示す。望遠鏡によって解像度が異なるため撮影される空間スケールは様々だが，5000光年にわたって伸びるジェットの構造が終端から源流のブラックホール（0.01光年）まで切

*² 国立天文台が所有する天文学専用スーパーコンピュータ。

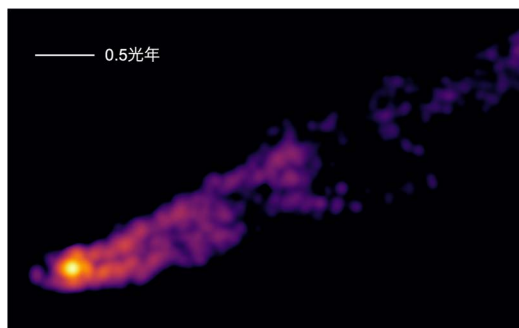


図3 EAVN 43 GHz帯で撮影したM87ジェットの根元付近の様子. BHが存在する中心部からジェットが右方向に向かって噴出し, 下流側で次第に右上方向に軌道が変化している様子が見られた(画像クレジット: Cui Yuzhu & EAVN Collaboration).

れ目なく撮影されている. もちろん各々の望遠鏡ではM87は過去に何度も観測されており, 個別の画像自体はそこまで目新しいものではないが, こうして多波長画像がほぼ一斉に, しかもEHTでBHが撮影されたタイミングで取得されたのは前例のないことである. その意味で今回得られた多波長画像は大変貴重なデータセットとなった.

ジェットの根元数光年以内の様子は解像度の高いVLBIによって詳しく空間分解されている. 特にジェットが明るく, 望遠鏡感度もよいセンチ波帯のVLBI望遠鏡(EAVN, EVN, VLBA)がジェットの撮影に力を発揮した. ここでは特に東アジアの望遠鏡群も活躍したEAVNの観測結果についてハイライトさせていただこう. 図3にEAVN 43 GHz(波長7ミリ)帯で撮影されたジェット根元の拡大画像を示す. 今回の観測で大変興味深い結果の1つだったのが, ジェット根元の噴出方向がこれまで知られていた方向とは大きく異なっていたことである. 過去のM87ジェットのVLBI観測では根元から外側まで直線的に伸びていたの

だが, 2017年の撮影時期はBH近傍ではほぼ真横に噴出し, そのあと次第に斜め上の方向に曲がっていたのである. これはジェットの噴出方向が年スケールで変化している可能性を示しているように見える. その詳しい起源については研究チームで現在も考察を進めているところだが, BHスピンや降着円盤の回転軸の変化に伴ってジェット噴出口が歳差運動している可能性も挙げられよう[13]. いずれにしても, 本結果はEHTのリング状構造とジェット根元のつながりを正しく理解するためには, ミリ波とセンチ波VLBIの同時観測が不可欠であることを示すよい例である.

3.2 可視光～ガンマ線帯の結果と放射エネルギースペクトル

時間的空間的に変化するジェットの研究で重要なことは, 天球面上でできるだけ同じ場所の放射強度をできるだけ同時に測定することであり, 今回のEHTと連携した多波長研究においてはできるだけ同時に中心核のみの明るさを測定する必要があった. しかし図2に示すとおり, 明らかに細く伸びているジェットからは電波のみならず可視光, 紫外線, X線が放射されており, さらに母銀河や銀河団由来の放射が混入してくる.

そこで研究チームはまずジェット以外の放射スペクトルを分離することを行った. 可視光・紫外線帯域の解析では, 巨大な母銀河とジェットの放射を分離するために, 母銀河の形状のモデルを用いて再現し, 最適化されたモデルを差し引くことで, ジェットのみの放射を抽出した. ハッブル宇宙望遠鏡は高い空間分解能を持つため, 得られた可視光画像には詳細な銀河構造が映し出されていた. そのため大きく複雑な母銀河を正確にモデル化する必要があり, 今回の場合では2つの独立したSérsicモデルを用いて銀河プロファイルを推定

*3 HST-1とは, M87ジェットに見られる複数の明るいノット成分のうち, 中心核から約1秒角の場所に存在する成分の名前である. 過去には中心核の明るさを上回る激しいフレアを起こし, また中心核からの距離が可視光やX線望遠鏡の空間分解能と同程度であることから, 中心核とHST-1の放射成分の分離は可視光・X線のデータ解析においてこれまでしばしば悩みの種になっていた.

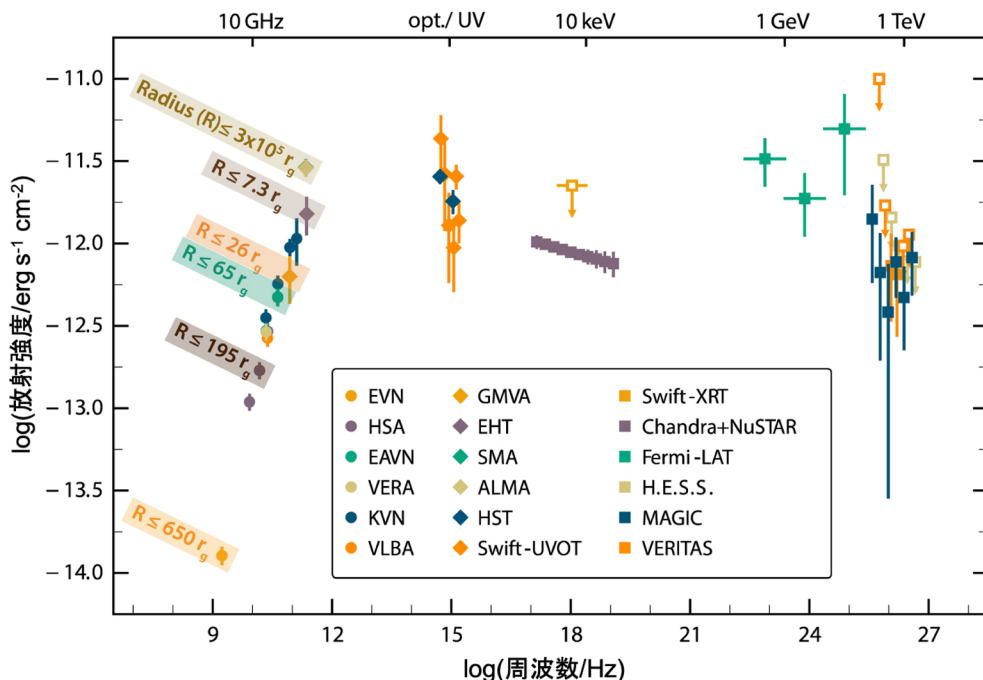


図4 多波長観測によって得られたM87中心核の放射エネルギースペクトル分布 (Spectral energy distributions: SED). 1 GHzの低周波電波から1 TeVの超高エネルギーガンマ線にかけて約17桁もの波長域にわたり準同時SEDを得ることができた. 電波帯におけるラベルは明るさを抽出した放射領域のサイズ (重力半径 (シュバルツシルト半径の半分) 単位) を示している. 白抜きデータ点は上限値を表す. カラーの図についてはWeb版を参照されたい.

し、それを差し引くことで中心核とHST-1^{*3}の明るさを見積もった. またSwift/UVOTによって取得された紫外線画像においては、空間分解能が十分でなかったこともあり1つのSérsicモデルを用いて銀河プロファイルを推定し画像から差し引いた. 銀河差し引き後の画像では、中心核とHST-1を分離することができなかったが、測定されたスペクトル指数からHST-1からの寄与は母銀河推定の不定性に比べて無視できることがわかったため、中心スペクトルを中心核からのものとして取得した. 一方でX線帯域の放射については、特にNuSTARによって取得された硬X線帯域において銀河団物質からの熱的放射がジェット放射と混在している. そこでChandraによって取得されたX線スペクトルデータと組み合わせた解析を行うことで両者の成分の分離を行うとともに、遠方のジェットから

の放射の寄与も推定して取り除いた.

このようにして得られた可視光・紫外線帯域の中心核とHST-1の光度を過去に報告された光度と合わせることで、1999年から2017年にかけての光度曲線を作成した. その結果、2017年の中心核およびHST-1の明るさは、両者とも過去もとも静穏なレベルであった. またEHTの2017年の観測キャンペーン期間中において、可視、X線、そしてガンマ線においても大きな光度変動は見られず、総じてこの時期のM87ジェットの活動性は非常に静穏であることがわかった.

以上のようにすべての波長で慎重な分析を重ねたのち、中心核の放射強度を測定し、波長ごとに並べることで電波からTeVガンマ線までの広帯域放射エネルギースペクトル分布を作成した. 図4はほぼ同時に取得されたM87のデータから、

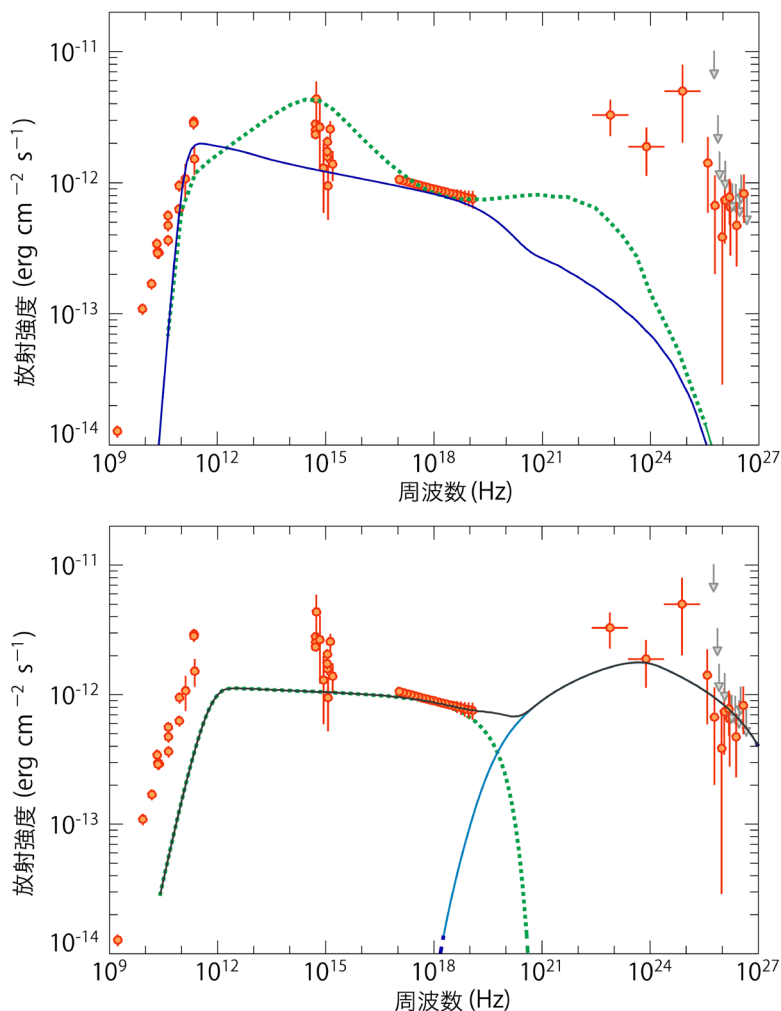


図5 上: 光子リングサイズの1ゾーン放射モデルのフィット結果 (モデル1a/1b). モデル1a (青実線) はX線まで伸びる右下がりのシンクロトロン放射成分, モデル1b (緑破線) はX線を谷間とする二山の成分が特徴的だ. 両モデルとも, 観測されたガンマ線フラックスを下回る結果となっている. 下: 高エネルギー放射を担う1ゾーン放射モデルのフィット結果 (モデル2). 理論モデルは観測された観測されたEHTフラックスを下回る結果となっている. 低周波数側の成分 (緑破線) と高周波数側の成分 (青実線) は, それぞれシンクロトロン放射成分と逆コンプトン散乱成分を示す. カラーの図についてはWeb版を参照されたい.

周辺の様々な放射成分を排除し, 中心核からの放射成分のみを抽出した, これまでで一番詳細な多波長スペクトルを表している.

4. 1ゾーン放射モデルとその解釈

まず今回得られたM87中心核の多波長スペクトルの新規性を確認しておこう. 1つ目は, 今回の観

測は同時観測であることだ. そのため過去の多波長観測データにおいては悩みの種であった放射強度の時間変化による不定性が排除できる. 2つ目は, 今回はEHTによる光子リング撮影が同時に行われたことだ. この2つの利点により, われわれはついに放射領域のサイズと時間変化の不定性を取り除いた議論を行うことができる. 今回の多波長

同時観測データが意味していることは何か？ いやいよ、このスペクトルを説明する放射モデルの議論を進めよう。本研究では、なるべく本質を抜き出すために、複雑で多彩な空間構造を持つジェットの詳細なモデリングを行うことを避けた。そして球で発光領域の形状を近似し、その仮定の範囲内で放射領域の基本性質を理解することを目的とした。

4.1 光子リングサイズを持つ1ゾーン放射モデル

われわれはまず、光子リングと同程度のサイズの放射領域を考えることにした。つまりM87ブラックホール重力半径のおよそ5.5倍を半径とするコンパクトなプラズマ球である。この球の中に一様等方な磁場と非熱的電子が存在し、非熱的な多波長放射を放つと考える。以降ではこの光子リングサイズを持つ1ゾーン放射モデルをモデル1と呼ぶ。モデル1の発案と検討は邦人研究者を中心に進められ、モデル1a（電子冷却有り）は筆者（紀）が、モデル1b（電子冷却無し）は川島氏が担当して放射スペクトルの理論計算を行った。モデル1bの理論計算については国立天文台のアテルイIIを用いた。

結果説明に入る前に、過去の研究について少しおさらいしよう。実は、これまでの多波長放射スペクトルの研究では、VLBIで計測される放射フラックスと理論スペクトルは直接フィッティングされないことが多かった。なぜなら、いくら高空間分解能のVLBIといえども理論モデルが预言する放射領域サイズには分解能が届かないため、VLBIフラックスは上限値を与えるのみと考えられていたからだ。しかしこの長年の悩ましい状況をEHTが変えた。光子リングの撮影だ。今回初めてサイズが計測されている光子リングを一様球で近似し、その領域からの多波長放射の性質を議論できるようになった。

図5に示したモデルフィッティングの結果をご覧いただきたい。過去の放射スペクトルの理論モデルではあまり見かけないやや奇妙な形状の理論スペクトルが描かれている。一目でわかる結

果は、理論モデルの放射フラックスが観測されるガンマ線のそれを大きく下回っていることだ。つまり、観測されるガンマ線放射は光子リング領域とは異なる場所で生成されていることが示唆される。この示唆は、電波からガンマ線までの放射が同一領域で発生すると考える従来の説に一石を投じることになる。

もうひとつ重要な結果はシンクロトロン自己吸収によるスペクトルの折れ曲がり周波数 (ν_{ssa}) がおよそ230 GHzという結果だ。今までは、上でも説明した放射モデルとVLBI空間分解能のサイズのミスマッチのため、多波長放射スペクトルにおける ν_{ssa} の議論はほとんど行われていなかった。得られた ν_{ssa} は、M87の低周波帯でコアシフト現象が検出されている事実 [14] とも整合的である。また、 ν_{ssa} は磁場強度も密接に関わる量だ。過去のM87の非同時多波長観測データに対する1ゾーン放射モデルでは放射領域の磁場強度を数ミリガウス程度と見積もっていたが、今回の結果は3桁も大きいおよそ5ガウスを示した。この差は ν_{ssa} の値の違いに反映される。

4.2 高エネルギー放射を担う1ゾーン放射モデル

上で述べたように、観測されるガンマ線フラックスを光子リングと同じ領域からの放射で説明をすることはできなかった。そこでモデル2では、VLBI放射については除外した全放射、つまり可視光、X線、ガンマ線放射については1ゾーン領域からの放射で説明できるか？について調べることにした。モデル2は、オランダ・アムステルダム大学のルッキーニ氏によって放射スペクトルの理論計算が行われた。

モデル2がモデル1と異なる点は、光子リングのサイズを放射領域の拘束条件として与えず、放射領域のサイズを自由パラメータとしてフィッティングを行ったことである。フィッティングの結果、図5に示すとおり、VLBI放射は除いた可視光、X線、ガンマ線フラックスを説明できるパラメータセットを得ることができた。しかし、モ

デル2ではモデルパラメータの自由度が多くパラメータの間で縮退が生じてしまうため、残念ながらパラメータに対する強い制限を与えることが難しいという問題も浮かび上がった。これは言い換えると、EHTによる光子リングの検出がこうした放射モデルのパラメータ制限において本質的な役割を果たしている表れともいえよう。

4.3 1ゾーン放射モデルからの知見

ジェットの噴出メカニズムを理解するためには、ジェット根元の物理状態を知ることが本質だ。M87ジェットのこれまで研究では、ジェット根元の物理状態について2つの異なる主張がある。1つは、シンクロトロン自己吸収に対する不透明度に注目してジェット根元が「磁気エネルギー密度が極めて卓越 [15]」しているという主張、そしてもう1つは、非同時多波長放射スペクトルのモデルフィットに基づき「粒子エネルギー密度が極めて卓越 [16, 17]」しているという主張である。両者の主張は、およそ10桁もの隔りがある。やはりブラックホール周辺理解は一筋縄ではいかない。

少なくとも2017年4月のM87について、一様1ゾーン放射モデルの範囲で得られた結論はこうだ。光子リングと同じサイズを持つ放射領域からの発光で電波、可視光からX線フラックスまでは再現できたが、ガンマ線放射フラックスについてはどうしても説明できない。つまり、ガンマ線は別の領域から発せられているらしいのだ。そして、放射領域内の磁気エネルギー密度は粒子エネルギー密度とおおよそ同程度と推定された。つまり、上で紹介した磁場卓越状態と粒子卓越状態のちょうど中間状態を示唆している。

ここまででわかったことは、むしろ1ゾーン放射モデルの限界と見解もあろう。例えば、モデル1が示唆する磁場強度だとX線を発生する電子のシンクロトロン冷却時間が短すぎて、実際のX線変動の時間スケールと矛盾することがわかる。これもモデルの問題点の一例である。やはり最終的には空間構造を持つジェットと降着円盤からの放射に関する詳

細なモデリングが必要なことは論をまたない。しかし、詳細なモデリングに進む事前準備として1ゾーン放射モデルは問題の本質の一端を示すことができたのではなかろうか？ この結果をきっかけにさらに進展する今後の研究に期待したい。

5. まとめ

本稿では2017年に行われたM87の多波長合同観測キャンペーンの研究成果を紹介した。本研究はBHシャドウ直接撮像データを多波長データと関連づけた初めての取り組みとなり、巨大BH研究新展開への第一歩といえよう。EHT観測は2018年と2021年にも実施され、この時も2017年と同様に大規模な多波長観測キャンペーンが実施された。2017年のM87は静穏期であったが、異なる時期の多波長データをEHT画像とともに比較することで、フレア期など全く異なる状態における巨大BHの性質を明らかにすることができるだろう。

また今回はM87の成果であったが、天の川銀河中心のいて座Aスターやガンマ線で明るいブレーザーなど他のEHTターゲットについても多波長観測が行われており、これらの多波長データの分析も鋭意進行中である。今後もEHTネットワークの拡張や新たな多波長望遠鏡の稼働に伴い、多波長連携に基づくBHサイエンスはより一層盛り上がりを見せていくだろう。

謝辞

本研究はEHT Collaboration, Fermi-LAT Collaboration, H.E.S.S Collaboration, MAGIC Collaboration, VERITAS Collaboration, EAVN Collaborationを含む19の多波長望遠鏡が参加し、32の国と地域から総勢760名を超える研究者の協力によって得られた合同成果です。本原稿執筆にあたり、川島朋尚氏（東京大学宇宙線研究所）、中村雅徳氏（八戸高専）ほか関係者の皆様から有益な助言をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] EHT Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L1
- [2] EHT Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L2
- [3] EHT Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L3
- [4] EHT Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L4
- [5] EHT Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L5
- [6] EHT Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L6
- [7] 松下聡樹 ほか, 2019, 天文月報, 112, 444
- [8] 田崎文得 ほか, 2019, 天文月報, 112, 446
- [9] 中村雅徳 ほか, 2019, 天文月報, 112, 448
- [10] 秋山和徳 ほか, 2019, 天文月報, 112, 450
- [11] EHT Collaboration, et al., 2021, ApJ, 910, L12
- [12] The EHT MWL Science Working Group, et al., 2021, ApJ, 911, L11
- [13] Liska, M., et al., 2018, MNRAS, 474, L81
- [14] Hada, K., et al., 2011, Nature, 477, 185
- [15] Kino, M., et al., 2015, ApJ, 803, 30
- [16] Abdo A. A., et al., 2009, ApJ, 707, 55
- [17] MAGIC Collaboration, et al., 2020, MNRAS, 492, 5354

Multi-wavelength Properties of M87 during the 2017 Event Horizon Telescope Campaign

Kazuhiro HADA¹, Mahito SASADA² and Motoki KINO³

¹Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 2-12 Hoshigaoka-cho, Mizusawa, Oshu, Iwate 023-0861, Japan

¹SOKENDAI, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan

²Hiroshima Astrophysical Science Center, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

³Kogakuin University of Technology & Engineering, Academic Support Center, 2665-1 Nakano, Hachioji, Tokyo 192-0015, Japan

³National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan

Abstract: The Event Horizon Telescope (EHT) images of the core of elliptical galaxy M87 provided visual evidence of the existence of black holes and confirmed the supermassive black hole paradigm of active galactic nuclei. In spring 2017, along with the EHT observations of M87, various multi-wavelength (radio, optical, ultraviolet, X-rays and γ -rays) instruments from both the ground and space also observed the object, resulting in an unprecedented multi-wavelength observing campaign. The aim of this campaign was to better understand the physics of black-hole-powered jet, its connection to high-energy emission and the activity state of the black hole when the shadow image was obtained. Here we overview the results from the multi-wavelength campaign.