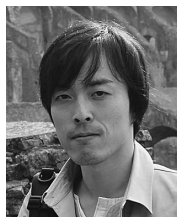


VERAで探る活動銀河核 ジェットのガンマ線 フレア現象 —GENJIプログラム—



新沼



永井



紀

新沼 浩太郎

〈山口大学理工学研究科 〒753-8512 山口県山口市吉田1677-1〉

e-mail: niinuma@yamaguchi-u.ac.jp

永井 洋

〈国立天文台チリ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: hiroshi.nagai@nao.ac.jp

紀 基樹

〈ISAS/JAXA 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉

e-mail: kino@vsop.isas.jaxa.jp

ほかGENJIプログラムメンバー

活動銀河中心核の巨大ブラックホールから噴出する相対論的プラズマジェット流は、電波から高エネルギーガンマ線にわたる広波長帯において非熱的放射で観測されている。しかし、特に高エネルギーガンマ線がいったいジェット中のどこで生成されるのか？ という基本的な問いの答はまだ得られていない。この問題に観測的に取り組むため、われわれは国内の超長基線電波干渉計（VLBI）であるVERAを用いた活動銀河核ジェットの高頻度モニタープログラム“GENJI”を開始した。本稿ではGENJIプログラムを開始するに至った経緯および初期成果について紹介する。

1. 背景

活動銀河中心核（Active Galactic Nucleus; 以後AGN）とは、銀河の中心にある巨大ブラックホールに周辺ガスが落ち込み、その中心核部分が極めて明るく輝く天体だ。そのうちのおよそ10%の中心核は強い電波放射を伴う。この電波放射の起源は相対論的ジェットであることが観測

的によく知られている¹⁾。相対論的ジェット流は光速の99.9%以上もの超高速度にまで達し、母銀河を超えるスケールにまで到達する。ジェットはその源流にある巨大ブラックホールが究極の動力源と目されているが、その形成メカニズムはまだ解明されておらず、宇宙物理学最大の謎の一つとなっている。

AGNジェットの中でも特にブレイザーと呼ば

れる天体は、ジェットの出方向が観測者の視線方向を向いた特異なジオメトリ構造を特徴とする。そのため相対論的ビーミング効果が顕著に効いて激しい時間変動を示し、電波からガンマ線にわたる多波長域において非熱的な放射が卓越する。近年、特にフェルミガンマ線衛星の精力的な観測によって782ものブレイザーがGeVガンマ線源として確認されている²⁾。ブレイザーからの放射スペクトルは典型的に二山のピークの形状を示す。低エネルギー側ピークはシンクロトロン放射、高エネルギー側ピークはシンクロトロン自己コンプトンもしくは周辺光子の逆コンプトン散乱と解釈されている^{3), 4)}。ジェットがもつエネルギーが激しく散逸される場所でガンマ線が発生されると考えられることから、ガンマ線放射領域を探ることはジェットの駆動機構の解明に向けたヒントを与えるとき期待される。

しかし「高エネルギーガンマ線はジェット中のどこで生成されるのか？」という最も基本的な点は未解決の疑問として残っている。ガンマ線望遠鏡で得られるフラックスの時間変動から放射領域サイズについて制限を与えることはできるが、空間分解能不足のため場所についての情報は得られないためだ。

2. VLBIの特長

「どこで高エネルギーガンマ線が発生しているのか？」この疑問に切り込むユニークな観測装置が超長基線電波干渉計 (VLBI) である。VLBIはすべての望遠鏡のなかで最も高い空間解像度を誇る。この最高空間解像度を実現する鍵は、距離の離れた複数の電波望遠鏡で同時刻にターゲット天体を観測し、取得された電波の波形信号を集めて相関をとり干渉させる技術だ。すると望遠鏡間の最長距離 (これを最長基線長と呼ぶ) に相当する口径をもつ仮想的な巨大電波望遠鏡を作ることができる。これを開口合成法と呼ぶ⁵⁾。この技術によって1ミリ秒角を切る驚異的な分解能に到達する。これは近傍の天体であれば1 pcを切る領域を分解可能だ。この空間スケールは、ガンマ線の時間変動から予想される放射領域サイズに肉薄する分解能である。よって、もしガンマ線フレアに呼応して明るくなる電波成分をVLBIで直接とらえることができれば、ガンマ線発生場所に対して決定的な制限を与えることができる。

3. ガンマ線の発生場所の予想

ガンマ線と電波フラックスの増光タイミングの関係は図1に示す3ケースが原理的に考えられ

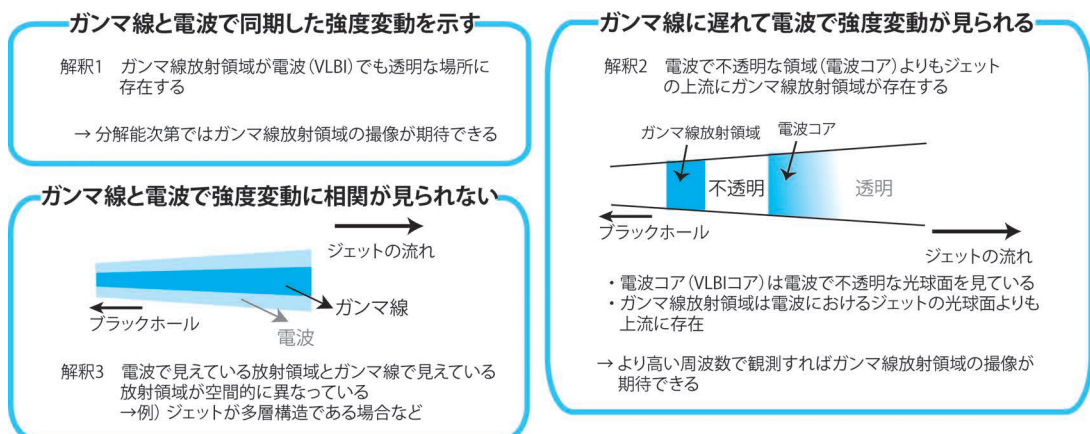


図1 電波とガンマ線変動の相関の有無から期待されるガンマ線フレア領域の所在に対する撮像。

る。以下では、各ケースが示唆するガンマ線放射領域の場所について考察してみよう。

一つ目は、電波増光とガンマ線フレアが同時に起こるといふケースだ。これはVLBIイメージ上のジェット根元の高輝度部分「電波コア」と呼ばれる領域のなかにガンマ線フレア放射領域があり、かつ電波コアがシンクロトロン自己吸収に対して透明な場合に起こる。ブレーザーの電波コアは、センチ波帯で時間平均してみるとシンクロトロン自己吸収に対して不透明な場合が多い⁶⁾。しかし、平穏期を大きく凌駕するフレア期のガンマ線フラックスを担う領域がシンクロトロン自己吸収に対して透明か？ 不透明か？ はよくわかっていない。透明なケースの一つとしてボストン大学 Marscher らが提唱するシナリオによれば7 mm 波長帯で見た電波コアは定常衝撃波領域と考えられている。そして電波コアより上流は電波では暗く観測されないと仮定している⁷⁾。

二つ目は、ガンマ線フレアから遅延して電波増光を起こすケースである。この場合もガンマ線フレア放射領域は電波コア中にあると考えるが、電波コアがシンクロトロン自己吸収に対して不透明である点が異なる。そのため、ガンマ線フレア時にはフレア放射領域は、電波コアの不透明表面で隠されてしまっており電波帯では変動が見えない。もしくは、シンクロトロン自己吸収の影響を強く受けセンチ波帯電波フラックス値は大幅に減少してしまい暗くて見えない^{6), 8)}。しかし、しばらく時間が経過してガンマ線フレア放射領域がジェット下流に伝播すると電波で不透明な領域から抜け出す可能性がある⁹⁾。もしくは、ガンマ線フレア放射領域が断熱膨張しながら下流に伝播するとき、フラックス値はほぼ保ちつつシンクロトロン自己吸収振動数が低周波側に下がっていく^{6), 8)}。その結果、センチ波帯において吸収の影響が弱ま

り遅延増光が起こると予想される。

三つ目は、ガンマ線変動と電波変動に全く相関がないというものだ。よく議論されている例として、芯と鞘の2層構造をもつジェットモデルが挙げられる¹⁰⁾。TeVガンマ線を出すためには強い相対論的ビーミング効果が必要とされるが、Mrk 421, Mrk 501といった代表的なTeVブレーザーのVLBI観測では超光速運動が発見されなかったことを説明するために発案されたモデルである*1。流れの遅い鞘の部分で主に電波放射を作り、一方で流れの速い芯の部分で逆コンプトン散乱することでTeVガンマ線放射を作り出しているというアイデアだ。つまり、ガンマ線と電波の放射領域が空間的に分離しているのだ。芯の部分から出る電波放射は強いビーミングを受けるため、ビーミングコーンの立体角中に観測者がいないと電波では芯の部分を直接見ることができない。実際にMrk 501をVLBIで観測すると、ジェットの軸が暗く稜線が明るい構造が観測されている¹²⁾。

4. GENJIプログラム黎明期

ここでは、われわれがGENJIプログラムを開始するきっかけとなった天体現象を紹介しておきたい。そのニュースを聞いたのは2008年のことだった。電波銀河3C 84からGeVガンマ線が検出されたのである¹³⁾。1990年代に活躍したコンプトンガンマ線衛星に搭載されたEnergetic Gamma-Ray Experiment Telescope (EGRET)では検出されていなかったのだが、フェルミガンマ線衛星に搭載されているLarge Area Telescope (LAT)が検出したガンマ線はEGRETによって得られた上限値よりも7倍も明るく、明らかにガンマ線増光が起こったことを示していた。これと同時に電波単一鏡観測でも3C 84で増光がしていることがわかっていた。「ひょっとすると電波

*1 過去のフォローアップ観測では観測頻度が不足しているため、正しく速度を測定できていなかった可能性がある。十分な高頻度の観測によって、2010年に超光速運動の兆候が検出されている¹¹⁾。

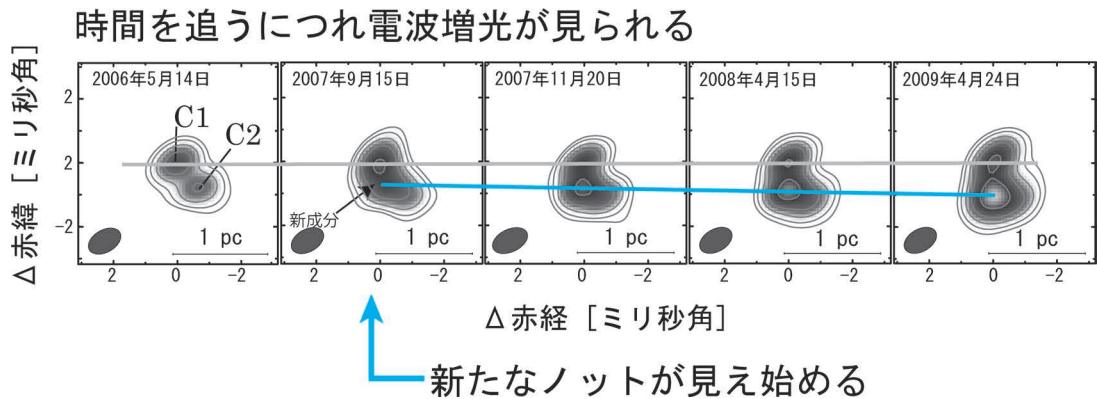


図2 VERA 22 GHzによる3C 84のモニター観測 (文献16より転載).

増光領域とガンマ線放射領域に何らかの関係があるのでは？」とわれわれは考え、国内VLBIを使って3C 84の電波増光領域を探る観測を行った。ちょうど同時期に、VERAプロジェクトのアーカイブデータに大量の3C 84観測履歴があることを本間希樹氏、廣田朋也氏から教えていただいた。3C 84は非常に明るい電波源であるため、VERAプロジェクト観測のキャリブレーター*2として頻繁に観測されていたというわけだ。何と幸運なことだ。われわれはこのニュースに興味した。このVERAで大量に観測された3C 84のデータ解析では当時VERAプロジェクトに在籍していた大学院生の鈴木賢太氏が活躍してくれた。そしてデータ解析の結果、極めて明るいノットが中心核から新たに放出される驚くべき瞬間を目の当たりにした。

ここで時系列を追って3C 84の活動性をまとめておこう。1980年代前半、3C 84のジェットは非常に活発で、センチ波帯の電波フラックスは何と60 Jyもの明るさに達していた¹⁴⁾。中心5 pc程度の領域に見える電波ローブはこれ以前の活動に起源したものであると考えられている¹⁵⁾。

しかし1985年以降、3C 84のジェット活動は低調になり電波フラックスは単調減光していた。ところが予想に反して2000年中頃に電波フラックスは増加に転じた。そして続く2006年後半頃に極めて明るいノット成分が新たに出現する現場をわれわれは発見した。VERAで得られた電波画像は、ノットの出現場所が中心核1 pc以内にあることを示してした(図2参照)。この成果は、記念すべき初のVERAを用いたAGNジェット観測の論文となった¹⁶⁾。

この新ノット成分の出現は、数年単位の長期スケールで見るとガンマ線フラックスが増光している時期に一致している¹³⁾。この新ノット成分とガンマ線の間には本質的な関連があるとわれわれは予感していた。折しも同時期にドイツのボンで行われた国際研究集会「Fermi meets Jansky」に永井、紀が参加し、早速この新しい観測成果をレポートした。ドイツから帰国する飛行機の中「こうしたモニター観測を系統的にできないだろうか？ そうすればガンマ線フレア現象に呼応した電波フラックスの振る舞いをとらえられるのでは？」という議論でわれわれの期待は膨らんだ。

*2 VLBI観測では相関処理が終わるまで観測の成否がわからない。したがって、ターゲット天体が未検出だった際に原因の切り分けを行うために、多少観測条件が悪くても確実に検出が期待できるような十分明るい電波源(以下キャリブレーター)を観測中に定期的にスケジュールに組み込むことが推奨されている。VERAプロジェクトの観測では、1-1.5時間に1回程度(磁気テープ1巻当たり1スキャン)明るい天体をキャリブレーターとして観測している。

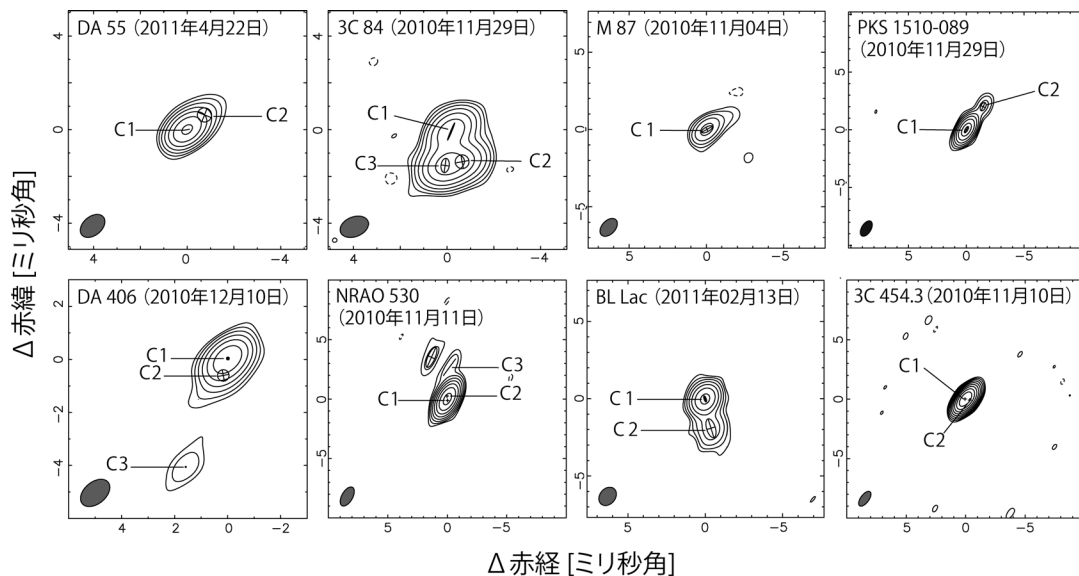


図3 GENJI “イメージギャラリー”. GENJIでモニターしている8天体の22 GHz電波イメージとモデルフィットによって分離できた各成分を示している. イメージ上方に天体名および観測日を示してある.

この議論が後のGENJIプログラム立ち上げへとつながっていった.

5. GENJIプログラムスタート

フェルミガンマ線衛星が観測を開始して以来、多くのブレーザーで突発的な巨大GeVガンマ線フレアや激しい時間変動の検出が相次ぎ、多波長で密なモニター観測が以前にもまして重要になってきた。ブレーザーは一般的に電波で非常に明るく、3C 84と同様、VERAプロジェクト観測におけるキャリブレーターとして頻りに観測されていた。しかもそれらのほとんどはあらゆる波長でよく研究されているいわば「王道」天体である。フェルミガンマ線衛星がそれらの天体を日々モニターしている一方で、残念なことにVLBIモニターとなると短くても1カ月程度の間隔が精一杯という現状であった^{17), 18)}。

これらの天体を適切なモニター頻度になるようにコーディネートすることができれば、これまでにない密なモニター観測が実現する。VERAプロジェクトにも親身に相談に乗っていただき、われ

われが注目している明るいブレーザー天体（電波銀河も含む）をVERAプロジェクトのキャリブレーターに採用してもらう方針が2010年に決まった。VERAプロジェクトの全面的な理解と協力のもとで、永井、紀、新沼を中心として同年11月からAGNモニタープログラムが試験的に開始された。プログラムはGamma-ray Emitting Notable-AGN Monitoring by Japanese VLBI, 略称GENJIとわれわれは命名した。合計8天体（2011年途中からさらに1天体を追加）を2週間に1回のペースで観測を行うことを目標としている（図3参照）。VERAプロジェクト観測のキャリブレーター枠を使わせてもらうという都合上、十分に電波で明るく、かつVERAプロジェクトの本来の目的であるメーザー源からさほど離角が離れていないという条件に見合う天体として、DA 55, DA 406, NRAO 530, 3C 454.3, OJ 287, PKS 1510-089, M 87, 3C 84, BL Lacを選定した。

初期のGENJI データを手にし始めた頃、まずはGENJIとして均一の品質で天体イメージを生み出すため解析手法の統一化や画像品質向上につ

いての検討を開始した。われわれGENJI チームは、得られたデータを注意深く解析する過程において、通常VERAプロジェクトで行われている振幅校正の精度をさらに高められるポイントに気づいた。大学院生の秋山和徳氏と永井が中心となり、特に大きな誤差要因となる各基線で得られる相互相関スペクトルの周波数依存性を修正する補正テーブルを導入することによって、振幅校正精度をおよそ10%程度以下に押さえることに成功した。こうしてGENJIチームはVERAプロジェクト全体における振幅校正精度の向上に対して重要な貢献を果たした。

6. 初期成果

6.1 最短モニター間隔のライトカーブ

VERAデータの振幅較正が、十分な精度と信頼度に到達できたので、あとは統一した解析手法を繰り返すのみとなった。GENJIメンバーそれぞれの担当天体の解析に尽力し、多数エポックの観測データは着々とライトカーブにプロットされていった。GENJI開始から7カ月分の高頻度VLBIモニターによるライトカーブデータがまとまり、いよいよGENJIプログラムの初論文が出版となった¹⁹⁾(図4参照)。天体によって観測頻度の重みを変えているためモニター間隔に多少のばらつきはあるが、7カ月間でこれほど密にモニターされたVLBIライトカーブは他には得られていない。

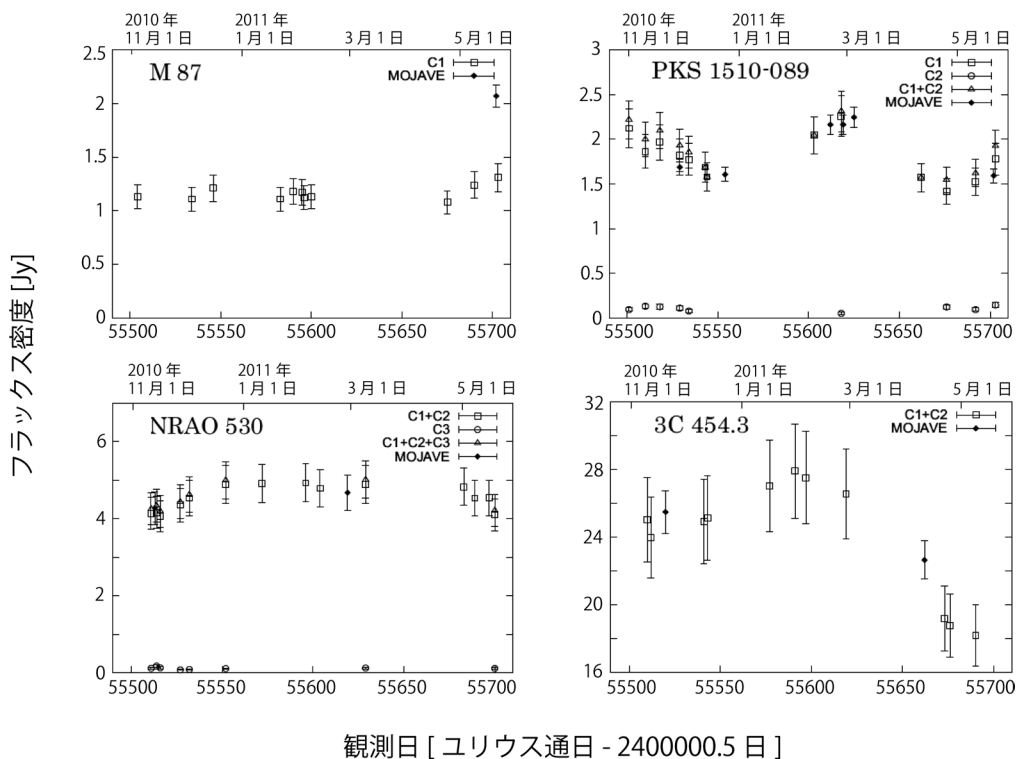


図4 GENJI開始後7カ月間のライトカーブ。ここではGENJIの一部の天体(M 87, PKS 1510-089, NRAO 530, 3C 454.3)のライトカーブのみ示している。また各天体とも成分ごとのフラックスおよびVLBAの15 GHzで観測されたデータ点(MOJAVE)をプロットしている。GENJIプログラム内で議論された天体の重要度によりモニター頻度にばらつきはあるが、いかに既存のプログラムよりも高頻度なモニターが実現できているかわかる。

比較のために、ライトカーブ中に同期間内における各天体のVLBAモニタープログラム (MOJAVE プログラム¹⁸⁾) のデータもプロットしている (黒). GENJIによるモニター点 (白抜) が、既存のモニタープログラムの典型的な数カ月モニター間隔よりも短時間で生じるフラックス変動をとらえていることがわかる.

6.2 巨大ガンマ線フレアの最速フォローアップ

6.2.1 NRAO 530 & 3C 454.3

われわれの期待的中した. GENJIプログラムの開始とほぼ時を同じくしてNRAO 530 (2010年10月末) と3C 454.3 (2010年11月初旬) がGeVガンマ線で巨大フレアを起こしたのである. まるでGENJI開始を祝うタイミングで打ち上げられた大きな花火のように思えた. 特にこの3C 454.3は2010年11月フレア時, 全天で最も明るいGeVガンマ線源となっていた.

NRAO 530についてはGeVフレア後, 22 GHzで緩やかに電波コアが増光している様子がGENJIデータによってとらえられた. 3C 454.3についてもGeVフレア後, 22 GHzで電波コアが緩やかに増光し, 減光していく様子を追うことに成功した. この両天体のフレアについて22 GHzでGeVフレアに対する数十日程度の遅延増光がはっきりと見て取れたことから, ガンマ線フレアの放射領域は図1の解釈2に示すように22 GHzにおける電波コアよりもジェットの上流に位置するか, もしくは放射領域そのものが当初光学的に厚かったためガンマ線が先に検出され, 放射領域が光学的に薄くなるに従い22 GHzや低周波側でもフレアが検出され始めたということになる²⁰⁾.

一方, 3C 454.3については同時期に230 GHzで観測され, 得られたライトカーブ²¹⁾ からGeVフレアに1日以内で同期した電波フレアをはっきりと確認することができた. 図1の解釈1により, この結果はGeVガンマ線フレアの放射領域と230 GHzのフレアの放射領域は同じ, もしくは非常に近いところに存在するというを示唆

していると考えられる. したがって, フレアの発生場所に周波数依存性があると仮定すると, 3C 454.3においてガンマ線や230 GHzでフレアが起きた領域はブラックホールからおよそ2.9 pc ジェットの下流に, 22 GHzの電波コアはそこからさらに10 pc程度下流に位置するということが予想される²²⁾.

6.2.2 PKS 1510-089

PKS 1510-089はGeV領域で活動的かつ電波でも明るいことがよく知られているため, GENJIの重要ターゲット天体の一つである. GENJIを開始以降の2011年7月と10月に大規模なGeVフレアが起こったのだが, 10月のフレアについてはすでに述べた3C 454.3に次いでレーザーのGeVフレア史上第2位の明るさとなった. われわれはGENJIを開始したことにより, この貴重な機会を逃さずフレア前後をVLBIでモニターすることに成功した.

これらのGeVフレアに対しGENJIデータを含む他波長データの比較を行ったところ, 電波帯のフレアピークが低周波側に向かって遅延していく様子をとらえることに成功した. 10月の巨大ガンマ線フレアの発生がミリ波フレアのピークとほぼ同時期であることから, 図1の解釈1のようにガンマ線フレアとミリ波フレアの放射領域は非常に近くに位置すると考えられる. さらに図5に示すように, VLBIデータ (22 GHz: GENJI, 15 GHz: MOJAVE) および単一鏡観測データ (23 GHz: F-GAMMA²³⁾, 15 GHz: F-GAMMA, OVRO²⁴⁾) においてフレアピークに30日程度の遅延が見られたため, フレアの放射領域が膨張していくにつれ光学的に薄くなり低周波側へフレアピークがシフトしていつているのだろうということも推測できる. また単一鏡とVLBIそれぞれで得られた電波コアフラックスの振る舞いが一致しているため, この遅延現象は電波コア内部で起きている現象であるとわかる.

一方, 7月のガンマ線フレアに対してはフレア

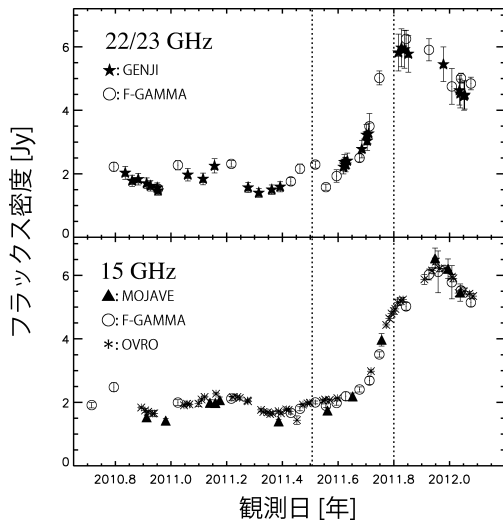


図5 15 GHz帯および22/23 GHzのライトカーブ。点線はそれぞれGeVフレアの発生時期（2011年7月と10月）を示している。15 GHzはMO-JAVE, F-GAMMA, OVROのデータ, 22 GHzはGENJI, 23 GHzはF-GAMMAのデータを用いている（文献25より転載）。

時に電波帯とのはっきりとした相関は見られず、9月頃から電波で緩やかな増光が見られたことから、図1の解釈2で示すようにこのガンマ線フレア放射領域は電波コアよりも光学的に厚いジェット上流のブラックホール近傍に位置するのではないかと考えられる。こうしてわれわれはブラックホールの位置はこの10月のガンマ線フレアの放射領域（ \approx ミリ波の電波コア）より10 pc以上の上流に位置すると推定した。

この成果はOriente, 小山らを中心に論文としてまとめられ、GENJIプログラムで得られたライトカーブの論文とほぼ同時期に受理された²⁵⁾。

7. GENJIからe-GENJIへ

VERAは直径20 mの電波望遠鏡4局で構成されており、電波望遠鏡間の基線長は1,000–2,300キロメートルである。一方、近年韓国で建設された直径21 mの電波望遠鏡3局で構成される韓国VLBIネットワーク(KVN)は、基線長は300–

500キロメートルである。VLBIの観測精度と感度は、観測局の組み合わせの数と基線長バラエティーの豊かさによって決定される。例えば4局では6個の組み合わせしかないが、7局では21個もの組み合わせが実現できるため、2倍程度の感度向上が期待できる。そこで、VERAとKVNを一つのVLBIアレイ（日韓VLBIアレイ）として観測を行う共同プロジェクトが日韓の間でスタートした。

2011年5月には国立天文台と韓国天文研究院の間で日韓合同相関器センターの共同運用の合意がなされ、日韓VLBIアレイへの期待が高まっている²⁶⁾。

現在、日韓VLBIアレイによる試験観測と並行して、日韓VLBIアレイによる科学的成果を最大限生み出すため各サイエンスサブワーキンググループ(SWG)で議論を重ねている。AGN SWGにおいてはキーサイエンスの一つとして、GENJIを柱にしたプロジェクト「拡張GENJI (extended-GENJI, 通称e-GENJI)」が検討されている。日韓VLBIを用いればGENJIのようなスナップショット観測を行った場合であっても空間周波数成分を効率よくサンプルすることができ構造をもった天体の高品質なイメージングが期待できる(図6参照)。より高品質な電波イメージを得ることによって、ブラックホールから噴出する相対論的ジェットの形成機構の謎に挑みたいと考えている。

理論的にも特殊相対論的磁気流体の数値実験の進展が目覚ましい。ブラックホール周辺で増幅された磁場が起因となり、およそ数百倍のブラックホール半径(R_g)離れた位置でローレンツ因子が10程度の相対論的ジェットが形成される可能性が近年の実験では示されつつある²⁷⁾(図7)。われわれはこの磁場駆動ジェットモデルを観測的に検証するため、最も近傍のジェット天体として知られるM87(図6)をe-GENJIのターゲットに選んだ。M87は中心ブラックホールの質量 $M_{BH}=6$

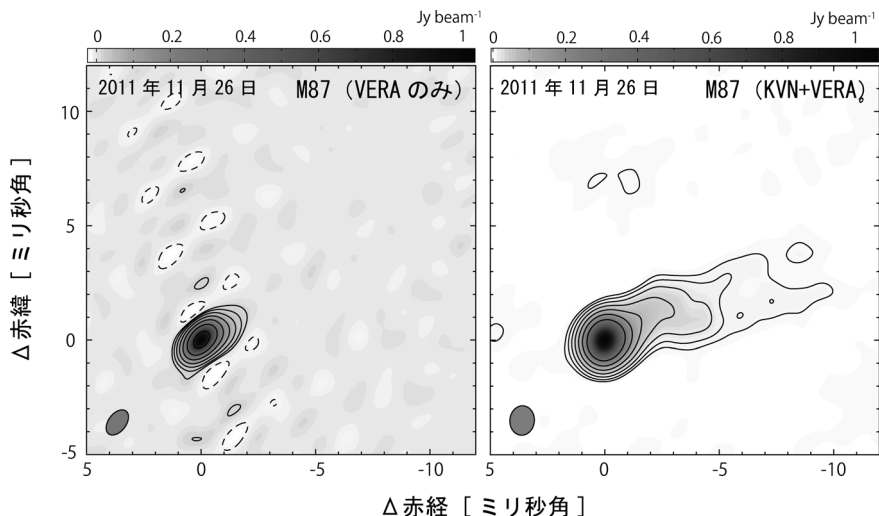


図6 日韓 VLBI アレイの観測周波数 22 GHz の試験観測で得られた M87 の VLBI イメージ。試験観測の簡易解析結果ではあるが、VERA のみ (左) に比べ KVN+VERA (右) で得られたイメージでは北西に伸びるジェットの様子が鮮明に描けている。各イメージの左下に位置する黒枠の楕円は各アレイのビームサイズ。

ジェット流のローレンツ因子

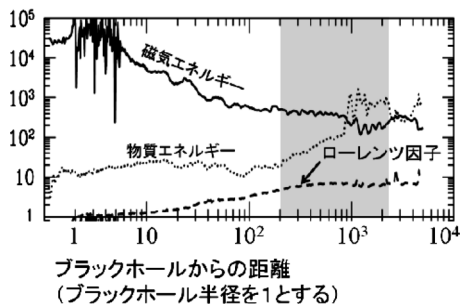


図7 ジェット流のローレンツ因子 (破線: 文献27より一部転載)。磁場エネルギーを物質へと変換してジェットが加速している。網領域は、日韓 VLBI 網が観測を行う空間スケール。

$\times 10^9$ 倍の太陽質量と極めて重く、かつ 16 Mpc の近傍に位置するため (1 ミリ秒角が M87 の距離で 0.08 pc に相当)、中心ブラックホールの見かけ角サイズが全天で最も大きい AGN ジェット天体である。M87 の距離において図7で示したジェットが相対論的速度へと加速されていると思われる領域サイズ (数百 R_s) は e-GENJI によってイメージング可能なスケールに相当する (図6の右、観測周波数 22 GHz における e-GENJI の空間

分解能が約 140 R_s 相当)。このスケールにおいて超光速運動が検出された例はこれまでにない。より高い品質の電波イメージが得られる 22 GHz 帯で高頻度モニター観測を実行すれば、このスケールにおけるジェットの速度を確実に計測でき、相対論的ジェットの形成機構に本質的な制限を与えることが期待できる。今後が楽しみである。

8. おわりに

VERA プロジェクト観測のキャリブレーターに注目したユニークな発想は、VLBI を用いた世界中の AGN モニタープログラム中でも最高頻度のサンプリング観測の実現につながった。VLBI の高い空間分解能に加えて、さらに高サンプリング頻度のモニター観測を実現することで、巨大 GeV ガンマ線フレアに遅延して起こる電波増光の様子を克明にとらえ始めた。こうして、ガンマ線がいったいジェット中のどこで生成されるのか? の謎にせまる貴重な手がかりが得られつつある現況を本稿では紹介した。

現在われわれは、VLBI をキーワードにした日本-イタリア間の共同研究を行っており、日韓

VLBI網のおよそ4倍の空間分解能を得ることが可能な日伊基線での試験的なVLBI観測も計画している。将来は、VERA 4局のみを用いたGENJIから、韓国やイタリアの観測局を含めたe-GENJIへ拡張して、ガンマ線放射領域のダイナミクスを、より高い空間分解能、より高い品質で直接的に撮像していく予定である。

9. 謝辞と共同研究者リスト

GENJIプログラムのメンバーは現在、新沼、永井、紀のほか、小山翔子、秋山和徳（東大）、秦 和弘、Monica Orienti、Marcello Giroletti (INAF/IRA)、日浦皓一朗、徂徠和夫（北大）、澤田-佐藤聡子、本間希樹、柴田克典（国立天文台）、Gabriele Giovannini (Bologna Univ.) となっています。本GENJIプログラムは国立天文台水沢 VLBI観測所による多大なご支援の下で行わせていただいています。VLBIを用いてこれほどの高頻度観測をさせていただけるこのうえない贅沢に、この場を借りて水沢VLBI観測所の方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Urry C. M., Padovani P., 1995, PASP 107, 803
- 2) Nolan P. L., et al., 2012, ApJS 199, 31
- 3) Sikora M., et al., 1994, ApJ 421, 153
- 4) Inoue S., Takahara F., 1996, ApJ 463, 555
- 5) Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W., Jr., 2001, "Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy," 2nd ed., New York: Wiley
- 6) Valtaoja E., et al., 1988, A&A 203, 1
- 7) Marscher A. P., et al., 2008, Nature 452, 966
- 8) Marscher A. P., Gear W. K., 1985, ApJ 298, 114
- 9) Kudryavtseva N. A., et al., 2011, MNRAS 415, 1631
- 10) Ghisellini G., et al., 2005, A&A 432, 401
- 11) Niinuma K., et al., 2012, ApJ 759, 84
- 12) Giroletti M., et al., 2004, ApJ 600, 127
- 13) Abdo A. A., et al., 2009, ApJ 699, 31
- 14) Nesterov N. S., et al., 1995, A&A 296, 628
- 15) Asada K., et al., 2006, PASJ 58, 261
- 16) Nagai H., et al., 2010, PASJ 62, L11
- 17) <http://www.bu.edu/blazars/VLBAproject.html>
- 18) Lister M. L., et al., 2009, AJ 137, 3718
- 19) Nagai H., et al., 2013, PASJ 65, 24
- 20) 秋山和徳 ほか, 日本天文学会2011年秋季年会, S11b
- 21) Vercellone S., et al., 2011, ApJ 736, L38
- 22) 秋山和徳 ほか, 日本天文学会2012年秋季年会, S20c
- 23) <http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/div/vlbi/fgamma/results.html>
- 24) <http://www.astro.caltech.edu/ovroblazars/index.php?page=home>
- 25) Orienti M., et al., 2013, MNRAS 428, 2418
- 26) 澤田-佐藤聡子 ほか, 2013, 天文月報 106, 7月号予定
- 27) McKinney J. C., 2006, MNRAS 368, 1561

GENJI Programme

Kotaro Niinuma

*Graduate School of Science and Engineering,
Yamaguchi University, 16771-1 Yoshida, Yamaguchi-shi, Yamaguchi 753-8512, Japan*

Hiroshi NAGAI

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

Motoki KINO

*Department of Space Astronomy and
Astrophysics, Institute of Space and Astronautical
Science, Japan Aerospace Exploration Agency,
3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara,
Kanagawa 252-5210, Japan*

GENJI Member

Abstract: It is well known that the non-thermal emission in relativistic jet, which emerges from the active galactic nucleus (AGN) is observed in a very wide range of wavelength between radio and VHE γ -ray. It is, however, still under-discussion about one of the most important issues, "how" and "where" such a high-energy particle is produced in the AGN jet? In order to explore gamma-ray emission regions in the AGN jet, we have started "GENJI" programme, which aims for dense monitoring of several radio bright γ -ray AGNs using VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry). In this paper, we introduce how "GENJI" programme was started, and the initial results.