

TeV γ 線ブレーザー Mrk421 のアストロメトリ観測

新沼浩太郎 (山口大学), 紀 基樹, 土居 明広 (ISAS/JAXA),
秦 和弘 (INAF/IRA), 小山 翔子 (東京大学), Rocco LICO, (INAF/IRA),
永井 洋 (NAOJ/ALMA), 磯部直樹 (ISAS/JAXA)

概要

2010年初旬に全天 X 線監視装置 (MAXI) により、TeV γ 線ブレーザー Mrk 421 の X 線で過去最大のフレアが捉えられた。[1]。大規模なフレアに伴うブラックホール近傍における振る舞いを調べるため、我々は Japanese VLBI Network (JVN) の 22 GHz 帯を用いてフレアの 20 日後から追観測を開始した。この追観測により、フレアに起因するジェットの出現を想像させる現象”インワードモーション”を捉えることに成功した [2]。しかしながらこのときの観測では Mrk 421 の絶対位置を得ることができなかったため、インワードモーションがジェットの本質的な動きであるのか、コア内部の構造変化による”見かけ”の動きであるのか切り分けることができなかった。2011年9月に再び Mrk 421 における大規模な X 線フレアを MAXI が捉えられたため [3]、我々はフレアの約一週間後から 2012年4月下旬まで、10日 - 20日おきという密な間隔で、VERA の 22 GHz 帯を用いたアストロメトリ観測を行った。簡易解析結果を見ると、X 線フレアの発生から 30 日程度経過してから Mrk 421 のコアの位置が大きくふらつき始め、120 日程度経過するとふらつきは収まったように見える。このコアの動きが X 線フレアに伴う新しいジェット成分の出現を示唆しているのではないかと考え、検討を重ねているところである。

Mrk 421 の高エネルギーフレア現象

Mrk 421 は TeV γ 線が初めて検出されたブレーザーであり、これまで TeV γ 線が検出されたブレーザーの中でも最近傍に位置する ($z = 0.031$, Mrk 421 の距離において 1 ミリ秒角は 0.61 パーセクに相当) ことで知られている。その近き故 VLBI を用いて”ブレーザー領域”を調べるには非常に適した天体である。さらには (TeV) γ 線や X 線などの高エネルギー観測によって大規模なフレアがしばしば検出されている。

Mrk 421 から超高エネルギー (VHE) γ 線の検出が報告されて以来 [4]、X 線や VHE γ 線フレアが何度か検出されている。2001年に発生した非常に大きな VHE γ 線フレア [5] に対しては、VLBA を用いた電波での追観測が行われた。このときの追観測はフレアの 5ヶ月後から開始され、3ヶ月おきに計 4 回の観測が実施された [6]。この追観測の結果、非常に大きなフレアであったにもかかわらず、フレアに起因したジェット成分や、フレアの残骸などを検出することはできなかった。こういった観測事実もあり、Mrk 421 においては高エネルギーフレアと電波観測 (VLBI) の間に相関が無さそうだということが言われてきた。

一方、2010年に X 線で全天をモニターしている観測装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image: [7]) や Swift/BAT [8] によって Mrk 421 における過去最大の X 線フレアが検出された。この X 線最大のフレアに対して JVN (Japanese VLBI network) を用いた密な追観測を実施した結果、X 線フレアに伴う相対論的ジェットの噴出を示唆する結果を得ることができた [2]。この観測では電波コアから約 1 ミリ秒角程度離れたところに位置するジェットが、見かけ上コアに超光速で近づく動きを示したことから相対論的なジェットの噴出の可能性を議論している。しかし電波コアそのものの絶対位置の情報を知ることができれば、大規模なフレアに伴い相対論的なジェットが噴出するということをより強く示すことができると思われる。

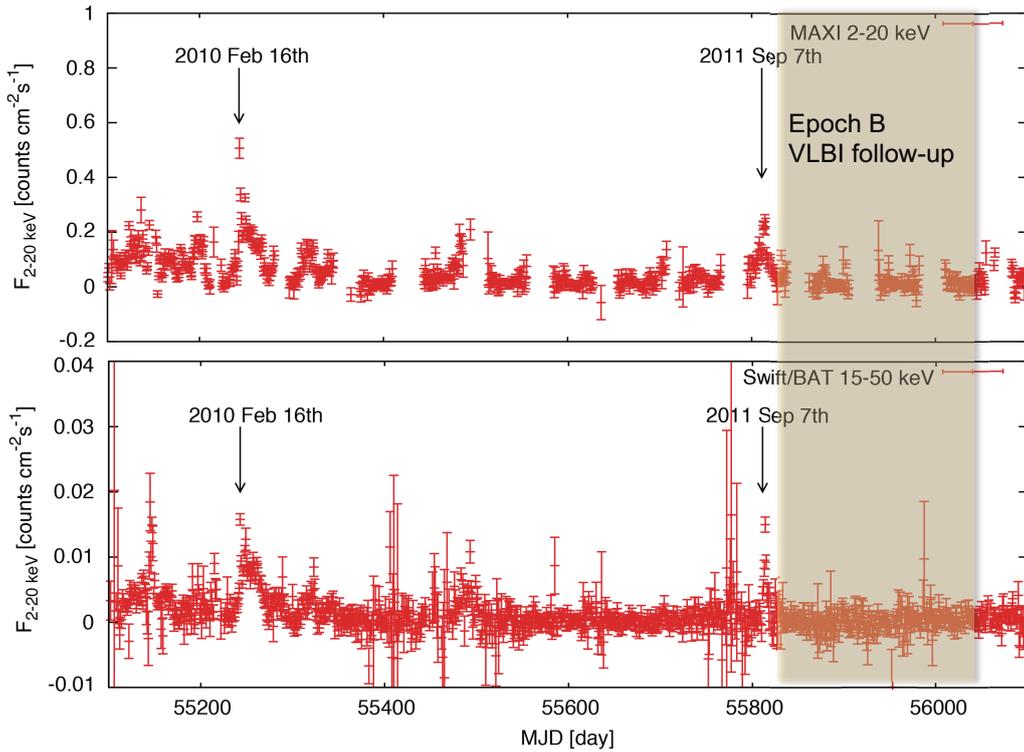


図 1: X 線で観測された Mrk 421 の光度曲線。上が MAXI によって観測された 2-20 keV の光度曲線。下は Swift/BAT で観測された 15-50 keV の光度曲線。色付きの時期が VERA による追観測を実施した期間である。

VLBI 観測

図 1 に示している 2011 年 9 月 7 日に発生した X 線フレアに対し、9 日後から VERA による追観測を開始した。観測期間は 2011 年 9 月 16 日から 2012 年 4 月 28 日までの約 7 ヶ月間であり、10 日 - 20 日間隔で計 13 エポック実施した。この追観測は過去報告されている同様の VLBI 観測の中で最も高頻度に行われたものである。観測周波数、観測モードはそれぞれ K バンド、2 ビーム観測によるアストロメトリモードであり、フレア後の電波コアの絶対位置の動きを捉えることを第一の目標とした。

アストロメトリ観測を行うため位置参照天体を決める必要があるのだが、Mrk 421 は過去アストロメトリ観測をされたという報告が無かったため、まずは最適な位置参照天体を探した。結果、Mrk 421 から離隔 1 度程度という近い位置に J1101+3904 という天体があり、そのジェット吹き出す向きが Mrk 421 のジェットの向きにだいたい直交するという本観測に適した天体をデータベース¹から見付けることができた。この天体を用いることで Mrk 421 の絶対位置を決定するためのアストロメトリ観測を行うことができるようになった。

結果

Mrk 421 の強度 (ピークフラックス $\sim 200 \text{ mJy beam}^{-1}$) に比べ、J1101+3904 は半分程度 (ピークフラックス $\sim 100 \text{ mJy beam}^{-1}$) と暗いため、Mrk 421 を J1101+3904 に対する位置参照天体として解析し、J1101+3904 の観測座標からのずれを Mrk 421 のものに焼き直すという過程を経ることにした。Mrk 421 と J1101+3904 の VLBI セルフキャリブレーションイメージ、及び J1101+3904 の位相補償イメージを図 2 に示す。図から分かるように、本観測により、Mrk 421、J1101+3904 とともに鮮明なイメージを得ることができている。

全てのエポックで得られた Mrk 421 のコア成分の位置ずれをジェット方向に射影した成分として抜き出し、観測開始時から時系列に並べたところ、X 線フレアから 30 日程度経過したところからジェットに沿った方向へ大きく振動するような動きを示した。この振動するような動きは 120 日程度間に連続して 2 回ほど (2 周期分) 見られた後、動きは収束し VLBI 観測開始時と同程度の位置に収まった (2012 年 2 月頃から)。

¹VLBA Calibrator List (<http://www.vlba.nrao.edu/astro/calib/vlbaCalib.txt>)

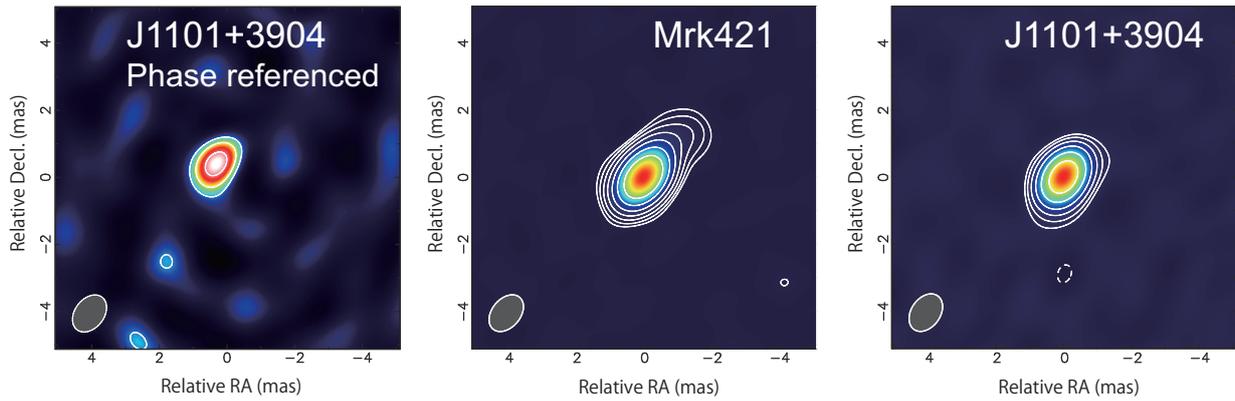


図 2: VERA の K バンドの観測によって得られた Mrk 421 と J1101+3904 の VLBI イメージ。左が J1101+3904 の位相補償イメージ (ピークフラックス $72.6 \text{ mJy beam}^{-1}$)。中央と右がそれぞれ Mrk 421 (ピークフラックス $212.0 \text{ mJy beam}^{-1}$) と J1101+3904 (ピークフラックス $89.5 \text{ mJy beam}^{-1}$) のセルフキャリブレーションイメージ。

議論・まとめ

ジェット方向に沿ってコアが振動する動きを詳しく見てみると、驚くことに最大で 40 日間の間に 0.6 mas もの動きを示していることが分かった。これは Mrk 421 の距離において約 0.4 パーセクに相当する。コアが動いて見えるということ、フレアに伴い明るいジェット成分が生まれ、それにより観測で見えているコアの重心が、新しく生まれたジェットの進行方向に引きずられて動いて見えていると仮定すると、驚くことにジェットの速度は光速の 10 倍を超えるものとなる。この結果はこれまで言われてきた近傍の TeV γ 線ブレーザーに対する電波 (VLBI) 観測では相対論的なジェットは検出されないという主張に真っ向から対立する結論となる。

これまでの結果との矛盾点について考えるに際し、我々が行なった観測と先行研究で行なわれてきた同様の観測の違いについて考えてみる。まず第一に挙げられる相違点は、開始のタイミングとその頻度である。特に我々が行った観測の実施頻度は、VLBI としては過去例を見ないほど高頻度である。これまでの Mrk 421 では高エネルギーフレアが起きても電波では相対論的ジェットの噴出を捉えることができないとしてきた観測は数ヶ月間隔程度で行なわれたものである。この観測頻度の大きな差が、結果の相違を生み出した最も大きな要因ではないかと考えている。我々の結果は VLBI においても時間分解能というパラメータが如何に重要かということを示した結果になったと考えている。

今後、フレアに伴い本当に相対論的なジェットが生まれたのかどうかを観測で捉えられたコアの振動を説明するモデルを構築することで証明する必要がある。また、この「コアの振動」が本当にフレアに起因する動きであるのかどうかについても静穏期における密な観測によって検証しなければならない。静穏期における検証については現在 VERA を用いた観測を開始したところである。

参考文献

- [1] Isobe N., et al. 2010, The Astronomer ' s Telegram, 2444, 1
- [2] Niinuma K., et al., 2012, ApJ 759, 84
- [3] Hiroi K., et al. 2011, The Astronomer ' s Telegram, 3637, 1
- [4] Punch, M., et al., 1992, Nature 358, 477
- [5] Krennrich, F., et al., 2001, ApJ 575, L9
- [6] Piner, B. G., Edwards, P. G., 2005, ApJ 622, 168
- [7] Matsuoka, M., et al., 2009, PASJ 61, 999
- [8] Swift/BAT database: <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/swift/results/transients/>
- [9] Isobe N., et al., 2010, PASJ 62, L55