

VLBI アストロメトリによる AGN ジェット放射領域 (衝撃波領域) のロケーション測定

秦和弘 (総研大/国立天文台水沢 VLBI 観測所)

共同研究者: 紀基樹 (国立天文台)、土居明広 (宇宙研)、

永井洋 (宇宙研)、萩原嘉昭 (国立天文台)

概要

活動銀河中心核 (Active Galactic Nuclei; AGNs) に付随する相対論的ジェットからの放射は中心エンジンからどれくらいの距離で解放されるのか? これは放射領域 (衝撃波領域) のロケーション問題と呼ばれ、未だ観測的に明らかでない。VLBI 観測で見られるミリ波電波コアはそのサイトとして有力な候補である。本研究では近傍の相対論的ジェット天体 M87 を対象に、'コアシフト' という現象に着目することで中心エンジンの位置を推定し、ミリ波電波コアのロケーションを求めた。その結果、M87 の 43GHz 電波コアは中心エンジンから 0.01pc 以内の距離に位置することが明らかになった。本結果は近年注目されている遠方衝撃波説とは大きく対立する結果である。

1. イントロダクション

多くの AGN ジェットでは電波 \sim γ 線に渡る非熱的放射が観測されており、これらはジェット内部における衝撃波形成を通して加速された相対論的電子によるものであることは広く受け入れられている。しかし、そのような衝撃波が中心エンジン (すなわちブラックホール) からどの程度の距離で初めて発生するのか、未だコンセンサスが得られていない。これは衝撃波のロケーション問題と呼ばれ、AGN ジェットのダイナミクス、高エネルギー放射、そして粒子加速に至る物理過程を明らかにする上で極めて根本的な問題である (図 1)。

現在衝撃波領域の有力な候補とされているのが VLBI イメージに現れるジェット根元の電波コアと呼ばれるコンパクト・高輝度な放射領域である。特にミリ波帯で観測される電波コアと γ 線の強度には強い相関が確認されており、放射電子が衝撃波を通じて高エネルギーにまで加速されていることを示唆している (Kovalev et al. 2010)。

しかしながら、ジェットからのシンクロトロン電波放射は中心エンジン近傍の高密度領域で吸収されるため、電波コアと中心エンジンの位置関係は VLBI イメージ上では決定できない。ジェット放射機構の標準理論とされている内部衝撃波モデルによると、衝撃波形成は中心エンジンから 0.1pc 程度の領域で起こるとされる (Spada et al. 2001)。一方近年、可視光偏波角の回転とバーストの相関に基づき、より遠方 10pc 以上も離れた位置での衝撃波形成を主張するモデルが注目され始めている (遠方衝撃波説; Marscher et al. 2008)。そこで今回我々はシンクロトロン自己吸収が引き起こす'コアシフト現象'に着目することにより、中心エンジンと電波コアの位置関係をこれまでに無い精度で決定することを試みた。

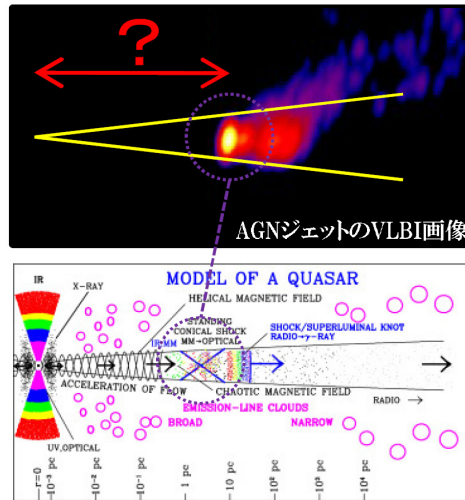


図 1. AGN ジェットの VLBI イメージ (上図) とジェットの遠方衝撃波モデル(下図、Marscher+2008)。
 ミリ波電波コアは中心エンジンから 1~10pc 以上も離れた場所にある定在衝撃波領域とされる

2. `コアシフト`の測定による中心エンジン位置の推定

ジェットの VLBI イメージにおいて電波コアの上流側に放射が見られないことから、電波コアはシンクロトロン放射に対する光学的厚さ $\tau_{\text{synch}} \sim 1$ 程度の領域に位置すると考えられる。以下で示すように、中心エンジンに対するこの位置は周波数に依存する。 τ_{synch} は磁場 B 、電子密度 n_e 、周波数 ν の関数である。 B と n_e は中心エンジンからの動径距離 r の冪状関数と仮定すると、 $\tau(r, \nu) = 1$ を解くことで $r(\tau = 1)$ は

$$r(\tau = 1) \propto \nu^{-\alpha}$$

と表わされる。この現象は`コアシフト`と呼ばれ、高周波で観測される電波コアほど位置が中心エンジンに近づく (図 2)。つまり、出来るだけ多くの周波数で電波コアの位置を測定し、ズレ具合の周波数依存性を見出すことが出来れば中心エンジンの位置が推定できるのである。

コアシフトは幾つかの AGN ジェットで実際に確認されている (Lobanov 1998)。しかしシフト量は通常 1 ミリ秒角以下と極めて小さいので、位置天文 VLBI 観測をすることが必須である。

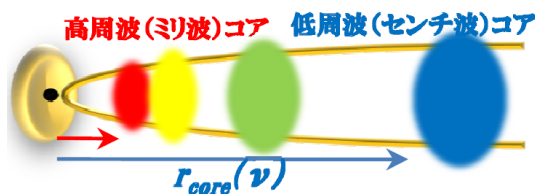


図 2. コアシフトの概念図

3. ターゲット : M87

おとめ座銀河団の中心部に位置する巨大電波銀河 M87 は卓越した相対論的ジェットを持つ再近傍の AGN である。その距離の近さ (16Mpc) ゆえ、VLBI 観測によって 0.1pc 以下の空間スケールまで構造が空間分解されている (図 3)。従って、典型的な距離にある AGN ジェット (多くはブレーザーであり、100Mpc よりもはるか遠方に存在) に比べ 10~100 倍小さなリニアスケールで位置天文測定が可能であり、電波コア-中心エンジンの位置関係を明らかにするのに理想的な天体である。

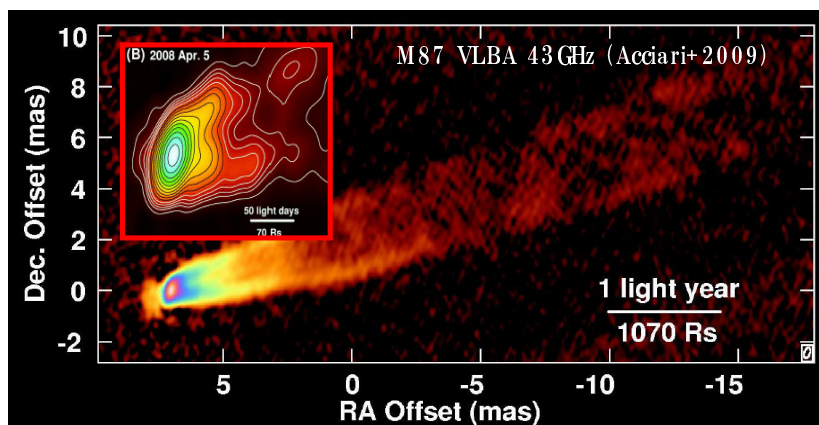


図 3. M87 の VLBI イメージ (Acciari et al. 2009)

4. 観測・データ

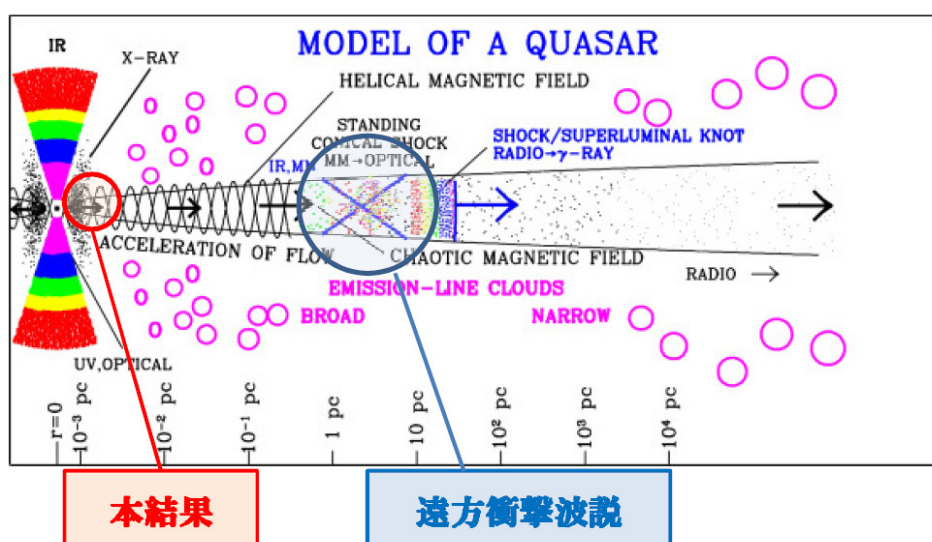
2010 年 4 月 8, 18 日、アメリカの VLBI 専用アレイ Very-Long-Baseline-Array (VLBA) を用いて M87 の多周波位相補償観測を行った。各エポックとも 12 時間ずつ、周波数は 2, 5, 8.4, 15, 22, 43 GHz を用いて観測した。位置参照源は離角 1.5 度離れた電波源 M84 を採用し、各周波数で M84 に対する M87 電波コアの天球面上での位置を測定した。

5. 結果

周波数が高くなるにつれてジェットの根元側へコア位置が遷移していく様子が確認された (プレリミナリ結果の都合上、図は割愛)。最も注目すべき傾向は、シフト量の大きさが高周波ほど急激に減少しており、43GHz より高い周波数ではほとんどコアシフトは打ち止めになっていることである。これは中心エンジンの位置が 43GHz コアに極めて近いことを意味している。シフト量の周波数依存性を定量的に評価するため、シフト量を関数 $r(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$ を仮定して最小 2 乗フィットを行った。その結果、観測されるコアシフトは周波数にほぼ逆比例しており、43GHz コアから東に 0.043mas の地点に収束していくことが分かった。ジェット内物理量が中心エンジンまで連続的に変化していると仮定すると、まさにこのポイントが中心エンジン位置に対応する。これはリニアスケールに換算すると、投影距離にしてわずか 0.003pc しか離れていないことを意味している。

6. 遠方説との対立

M87 では中心核から $\sim 80\text{pc}$ 離れた場所に位置するジェット成分に約 $6c$ の超光速運動が観測されていることから、視線方向に対するジェットの傾き角として約 20 度が示唆されている。この投影効果を補正しても、 43GHz 電波コアは中心エンジンから 0.01pc 以内の領域で既に形成されていることになる。これは遠方衝撃波説とは 100 倍以上も隔たりのある結果である。本成果は約 0.001pc というこれまでにない位置精度で電波コアのロケーションを推定した点で信頼性が高い。今後は本アプローチに基づく中心エンジン-電波コア間距離測定サンプルを増やし、本結果の普遍性を検証していく予定である。



参考文献

- Acciari et al, 2009, Science, 325, 444
- Kovalev et al, 2009, 696, 17
- Lobanov, A., 1998, A&A, 330, 79
- Marscher et al, 2008, Nature, 452, 996
- Spada et al, 2001, MNRAS, 325, 1559