

氏 名 秦 和弘

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1480 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Toward the Origin of AGN Jet: VLBI Study of Messier 87

論文審査委員 主 査 准教授 本間 希樹
教授 立松 健一
准教授 關本 裕太郎
教授 嶺重 慎 京都大学
准教授 亀野 誠二 鹿児島大学

Relativistic jets in active galactic nuclei (AGN) are the most energetic phenomena in the Universe. It is widely accepted that AGN jets are ultimately powered by the “central engine” consisting of a supermassive black hole and an accretion disk, and radiate nonthermal emission created by highly accelerated particles. The detailed mechanism of the jet formation and the origin of the high-energy emission are, however, still longstanding problems in astrophysics. A key to answer these issues is to probe such sites directly with Very-Long-Baseline-Interferometry (VLBI) – the ultimate case of interferometry.

In this thesis, we present the VLBI observations of the nearby radio galaxy M 87. Due to its proximity and intense γ -ray emission, this source is the best target to explore the above issues.

First, in order to specify the location of the central engine, we report the astrometric VLBI observations of M 87 using the multi-frequency phase-referencing technique at 2, 5, 8, 15, 22 and 43 GHz. Specifying the central engine location is the most important challenge for understanding the jet formation and emission, but its location has not been determined yet for M 87, due to the opacity effect at the jet base (a “radio core”). Here we show that, as the jet base becomes more transparent at higher frequencies, the accurate position measurements of the radio core allow us to determine the upstream end of the jet, which is supposed to be the most probable location of the central engine. We have revealed that the central engine of M 87 is located within 14-23 Schwarzschild radii (R_s) from the 43-GHz radio core. This provides conclusive evidence that the M87 jet is launched with a wide opening angle, indicating that the initial jet formation region is actually beginning to be resolved. On the other hand, the derived separation between the black hole and the radio core in M 87 is remarkably smaller than those for some blazars.

Second, following the constraint on the central engine location, we have extensively investigated the jet structure as a function of the distance from the central engine, based on the VLBI at 2, 5, 8, 15, 22, 43 and 86 GHz. We revealed that the M 87 jet maintains a paraboloidal structure over the wide range of distance from ~ 100 to $\sim 10^5 R_s$. This is evidence that the M 87 jet is subject to the collimation process and not reach the final collimation state within this scale. Toward the central engine, we further found that the size of the radio core smoothly connects with this jet shape down to a few $10s R_s$. On the other hand, based on the 86 GHz analysis, a possible faster convergence of the flow is suggested around a few $10s$ to

$\sim 10 R_s$ from the black hole. We discuss the radial profile of the magnetic field using the core shifts and other literature. We also estimated the expected radial profile of the jet velocity based on the observed jet shape and the magnetic field. We found that the inferred gradual acceleration profile can reasonably reproduce the observed discrepant speeds between the sub-luminal inner jet ($\sim 0.4c$ at $400 R_s$) and the super-luminal outer jet ($\sim 4c$ at $4 \times 10^5 R_s$).

Third, we have also examined the possible correlation between radio and Very-High-Energy (VHE) **gamma**-ray activities of M 87. Our VLBI observations have successfully synchronized with a giant VHE flaring episode from M 87 in 2010 April. We have constrained the location of this VHE **gamma**-ray flare as the immediate vicinity of the black hole. We did not detect strongly enhanced activities at the radio band during the flare. We confirmed the inverted radio core spectra up to 43 GHz during the flare phase, implying that the VHE emission site is embedded in the optically thick region at the observed radio band.

In particular, our findings presented here demonstrate critical importances of future VLBI at submillimeter regime for study of AGN jets.

本論文は、おとめ座銀河団の巨大楕円銀河M87の活動銀河中心核(Active Galactic Nuclei: AGN)について、電波干渉計による超高分解能観測の結果を報告するものである。AGNはブラックホールに落ち込むガスの重力エネルギーを解放して莫大なエネルギーを放射する宇宙で最も活動的な天体で、AGNブラックホールやその周囲の降着円盤の直接検出、また、AGNジェット加速やコリメーション機構の解明は現代天文学における最重要課題の一つである。M87はジェットを有するAGNとしては最近傍のものであり、ブラックホールの見かけの大きさが銀河系中心核Sgr A*に次いで全天で2番目に大きいなど、AGNジェットやブラックホール近傍の構造を探る上での最重要天体である。

出願者は、このような背景の中、米国の電波干渉計VLBAを用いてM87の多周波同時位置天文観測を実行した。この観測は、2 GHzから43 GHzの6周波数帯で相対VLBI観測をほぼ同時に行なうという前例のないもので、再現性を確かめるために約10日をおいて2回の観測を実施した。この観測から出願者は、M87の電波コアが周波数 ν の -0.94 乗に比例して変位する“コアシフト”を検出し、無限周波数での変位の収束点を求めた。標準的なジェットモデルに準拠すればこの収束点がブラックホールの位置になることに基づき、出願者はM87では電波で明るいコアがシュバルツシルト半径の10倍程度以内の精度でブラックホールの近傍にあることを初めて示した。この研究以前には、M87のブラックホールは電波コア近傍に付随するという説と、そのはるか上流に存在するという説が存在していたが、標準的なジェットモデルに立てば前者となることが本研究により示された。また、M87のジェットの原点を明らかにしたことで、M87のジェットはブラックホールからの距離とともに開口角が徐々に小さくなること、すなわち、観測されているM87のジェットはその加速領域を見ていることを明らかにした。この発見は、AGNにおけるジェットの加速機構の本質に迫る重要なものであり、本研究はNature誌にHada et al.(2011)として出版された。

さらに、出願者はM87の多周波電波像の解析から、M87のジェット形状がブラックホールからの距離 r に応じてどのように変化するかを調べ、 r がシュバルツシルト半径の100倍から10万倍の領域ではジェットの幅が r の 0.57 乗に比例する冪関数に従うことを示した。また、86 GHzの観測データを加えることで、ブラックホール近傍ではこの冪指数がさらに大きくなる可能性を指摘した。さらに、トロイダル磁場が保存されるとの仮定のもと、観測されたジェットの形状から予測されるジェットの速度場も検討し、この速度場がブラックホール近傍の亜光速の速度場と、中心からシュバルツシルト半径の40万倍離れた位置にあるHST-1とよばれる明るいノットの（見かけの）超光速運動を同時に説明でき、かつ、M87のジェット・カウンタージェットの輝度比も再現可能であることを示した。出願者が提示するジェットの速度場は今後さらなる詳細な観測でその正否を確認されるべきものであるが、AGNジェットの速度場を中心天体からの距離として明らかにすることはジェットの加速メカニズムを探る上で大きな鍵となり、その意味でこの研究結果も国際的な学術雑誌に査読論文として出版するに十分に値すると判断される。

このように、本研究は、M87の高分解能観測という手段でAGN研究における根本的な問題に挑戦して世界レベルの高い成果を上げたものであり、かつ出願者が観測、解析から議論にいたるまで主体的に研究を進めたことも十分に認められる。従って、審査委員会は全会一致で本論文が博士論文として優れたものであることを認め、合格であると判断する。