

氏 名 Yuzhu CUI

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2284 号

学位授与の日付 2021 年 12 月 31 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 Probing the formation region of relativistic jet in nearby
active galactic nucleus M87 with the East Asian VLBI
Network

論文審査委員 主 査 亀野 誠二
天文科学専攻 教授
今西 昌俊
天文科学専攻 助教
泉 拓磨
天文科学専攻 助教
新沼 浩太郎
山口大学
大学院創成科学研究科 教授
川島 朋尚
東京大学 宇宙線研究所
ICRR フェロー

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Yuzhu CUI

Title

Probing the formation region of relativistic jet in nearby active galactic nucleus M87 with the East Asian VLBI Network

Relativistic jets in Active Galactic Nuclei (AGN) are the most energetic phenomena in the universe and believed to be powered by the accretion of matter onto the central supermassive black holes (SMBH). Since the first discovery of AGN jet in the giant elliptical galaxy M87, the formation mechanism of AGN jets is still among the central key questions in astrophysics. To better understand the formation of AGN jets, the key is to directly resolve the innermost jet regions close to the central black hole where the jet is just generated from the central engine.

To tackle this challenging question, in this thesis we focus on the nearby radio galaxy M87. Thanks to its proximity, we can resolve the jet formation regions significantly close to the black hole with Very Long Baseline Interferometry (VLBI), as represented by the recent BH shadow imaging with the Event Horizon Telescope (EHT). Thus, M87 is the best target to study in detail the physics of AGN jet formation mechanisms and its connection to SMBH.

To monitor the jet dynamics of M87, we especially made use of the data from the East Asian VLBI Network (EAVN). EAVN is a newly established international VLBI network in East Asia. Therefore, in Chapter 3, we firstly perform detailed evaluation of imaging performance of EAVN based on two representative epochs observed in 2017. We especially carefully compare the imaging performance between KaVA (KVN and VERA Array) and KaVA + Tianma65m + Nanshan26m which is the core array of EAVN. We demonstrate that Tianma 65m Radio Telescope significantly enhances the overall array sensitivity (a factor of 4 improvement in baseline sensitivity and 2 in image dynamic range compared to the case of KaVA), while the addition of Nanshan 26m Radio Telescope further doubles the east-west angular resolution. Therefore, we conclude that EAVN is a powerful VLBI array to study AGN jets.

After validating the imaging performance of the EAVN array, in Chapter 4, we then move to detailed study of M87 jet. In our study, we performed intensive monitoring of the M87 jet with the EAVN between 2013 and 2021 to trace the dynamics of M87 jets at 43 GHz and 22GHz. Moreover, to further increase our time coverage and complement

the EAVN data, we additionally analyzed various archival VLBI data on M87 that were obtained between 2006 and 2018, resulting in a total of 159 epochs VLBI data for imaging and another 159 data for a light curve analysis.

Thanks to the extensive analysis of a large number of high-quality data set, we successfully obtained a set of high-fidelity, high-resolution images for the innermost regions of the M87 jet covering a broad range of time scales from days to weeks to decades, which for the first time allowed us to reveal the long-term evolution of this jet in unprecedented detail, as well as to confirm the short-term structural evolution (e.g., ejection of relativistic flows) that was previously suggested. By stacking the obtained jet images on a yearly basis, we found significant structural variation near the jet base on time scales of years, especially in the direction transverse to the jet axis. We carefully measured the variation of jet position angle (PA) as a function of time. Together with PA measured in the literature, we discovered that the M87 jet appears to be periodically oscillating which could be difficult to explain by hydrodynamical instability effects. We tested/modeled the observed properties of M87 via a precessing jet model. We demonstrated that the precessing jet scenario can successfully explain the observed jet PA oscillation with a set of reasonable model parameters. We derived that the precession periodicity (9.64 ± 0.46) years, half opening angle of precession cone (2.2 ± 0.03) degrees and viewing angle with respect to the precession axis (29.01 ± 0.27) degrees, respectively. Moreover, the observed correlation between the variability of core flux and viewing angle additionally supports the precession scenario rather than the instability model.

Knowing that the M87 jet base is precessing, we further discussed the possible origin causing such precession. We considered two popular models responsible for precession of AGN jets: the binary black hole (BBH) scenario and the Lense-Thirring (LT) effect caused by the misalignment between the normal of accretion disk and the spin vector of the central BH. We conclude that the BBH scenario is unlikely since it requires an extremely close BBH separation and short orbital period to reproduce the observed results. On the other hand, the precession periodicity estimated from the LT effect is on a time scale of ~ 10 years, which is consistent with our best-fitting results. Moreover, the possible intrinsic change of initial jet launching speed may be a natural consequence of the BH+disk system being not stationary. Hence, we suggest that the precession seen at the M87 jet base is most likely triggered by the LT effect rather than BBH. In turn, this strongly suggests that the SMBH of M87 is spinning, i.e., a Kerr black hole. This is in good agreement with the recent implications from the EHT, and moreover, provides another strong piece of evidence that the M87 jet is ultimately generated by the Blandford&Znajek mechanism, where the spinning energy of BH is the primary source of the jet power.

The presence of precession at the jet base of M87 also highlights that low-frequency (<230GHz) VLBI observations are very important for EHT, since the proper interpretation of the EHT images requires accurate input of large-scale jet parameters (e.g., jet viewing angle, jet speed and PA). The precession naturally indicates that the jet viewing angle is changing with time, and our results indicate that the jet viewing angle was minimum during 2017 when the first EHT images of M87 was obtained, suggesting that the Doppler-boosting effect was stronger than in the other years. Future, more detailed joint analysis of simultaneous EAVN and EHT data will allow us to reveal/constrain the direct connection between the jet base and BH more definitively.

Finally, our M87 results based on intensive analysis at the innermost jet region suggest that a tilted accretion existing in the central engine. This could be a common feature in the AGN showing a wobbling jet. Our study and discussion provide a good guideline to similar studies for other sources. After increasing numbers of sources being identified the existence of a tilted accretion disk inside, the unification of AGN may be updated.

In summary, our results presented here bring about a new insight into the powerful jet formation mechanism from supermassive black holes. The dynamics of the downstream jets are indeed tightly connected to the dynamic properties of the central engine. Therefore, our study here demonstrates that EHT alone is not enough, but joint low-frequency VLBI observations are critically important to fully constrain the fundamental physics of SMBH and jet launching.

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 Yuzhu CUI

Title
論文題目 Probing the formation region of relativistic jet in nearby active galactic nucleus M87 with the East Asian VLBI Network

本論文は、East Asian VLBI Network (EAVN) の VLBI (超長基線干渉計) 像合成性能評価と、EAVN による電波銀河 M 87 のモニター観測結果で得られたジェットの歳差運動の検出の科学的成果から構成される。活動銀河核 (AGN) は大質量ブラックホール (SMBH) への質量降着により電磁波やジェットを放つ宇宙で最も活動的な天体であり、エネルギー生成機構やジェットの生成・加速機構は現代天文学の重要課題である。VLBI は天文学最高の角分解能によって AGN の機構を解明する重要な観測方法であり、手法の確立と性能評価が要求され、それに基づく観測結果から得られる物理機構が理解されることが重要である。

出願者は EAVN を用いて 2013 年から 2021 年まで 22 GHz と 43 GHz で電波銀河 M 87 を観測し、これに 2006 年から 2018 年までの VLBA アーカイブデータを加えて計 159 期の撮像モニターを実施した。EAVN は日本・韓国・中国の VLBI 局から成る混成アレイであり、均質アレイである VLBA に比べて煩雑な較正手法と性能評価が求められる。特に EAVN の感度の要となる Tianma 65m 鏡 (TMRT) と角分解能の要となる Nanshan 26m 鏡 (NSRT) は、既存の VERA・KVN への新規参入局である。出願者は標準的なシステム雑音の計測と、点源と見做せる天体(1219+044) のビジビリティの比較により、TMRT と NSRT の開口能率を求め、構造を持つ天体 (3C 273, M 84, M 87) のビジビリティに適用して、1 ミリ秒角を切る角分解能とダイナミックレンジ 3000 を超える撮像性能を得た。VLBA とも比較して遜色なくほぼ一致する撮像性能を確立した意義は高く、この成果は査読誌 *Research in Astronomy and Astrophysics* に Yu-Zhu Cui et al. (2021) *Res. Astron. Astrophys.* **21**, 205 として出版されている。

申請者は EAVN による M 87 の撮像モニターデータを解析し、ジェットのノットを少なくとも 7 成分同定して見かけの速度と放出の方位角を計測した。その結果 9.46 ± 0.46 年の周期での方位角の変動を発見した。見かけの速度の変化や輝度の変化とも合わせて、視線に対して $29^{\circ}.01 \pm 0^{\circ}.27$ 傾いた軸を中心に半開口角 $2^{\circ}.20 \pm 0^{\circ}.03$ でジェットが歳差運動する 3 次元モデルによって、観測された方位角の周期変動を説明した。ジェットの方位角変動は M 87 において過去にも報告例はあり、歳差運動以外にもケルビン-ヘルムホルツ不安定性によって生じているなどの主張もあるが、本研究はモニター期間や撮像回数、位置計測精度の品質が高く信頼できる結果であり、2 周期に渡る方位角の変動と振幅の安定性から歳差運動が尤もらしいと結論付けている。

ジェットの歳差運動の原因として、本研究では SMBH のスピンによる慣性系の引摺りに起因する Lense-Thirring 効果を提案している。ジェットが降着円盤に対して垂直方向

に放出され、降着円盤の回転軸が SMBH スピン軸に対して傾いているなら、Lense-Thirring 効果によって降着円盤が歳差運動を受けるため、ジェットの方位角の周期変動が説明できる。観測された歳差周期から、ジェットのコリメーションに寄与する降着円盤半径が重力半径の 7 – 14 倍、SMBH スピンパラメータが 0.1 – 0.9 という縮退した制約が課せられる。撮像性能が将来向上してジェット根本の降着円盤半径が計測できれば、スピンパラメータも求めうることを示された。AGN ジェットの駆動に SMBH スピンが関わるという Brandford-Znajek 機構の検証となり、重要な考察である。Lense-Thirring 効果以外の歳差運動の原因として考えられるブラックホール連星系 (BBH) については、Event-Horizon Telescope (EHT) で撮像されたブラックホールシャドウから BBH 軌道の上限を与えると 10 年以内に合体すると見積もられるため、棄却している。以上の通り、本研究は信頼性の高いジェットの運動モデルを構築し、その結果 SMBH スピンによる Lense-Thirring 効果を導いた、価値の高いものである。特に、ブラックホール・降着円盤・ジェットという、AGN を特徴付ける構成要素を繋げて、ジェット駆動機構の解明と一般相対論的效果の検証に至る道筋を示した功績は大きく、科学的成果が査読誌に申請者の筆頭著書論文として早期に出版されることが強く期待される。申請者は電波干渉計の深い理解に基づいて混成アレイの撮像性能評価手法を獲得し、膨大な VLBI 撮像モニター結果を丹念にまとめ、本研究の成果をまとめる力量を示した。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水準にあるものと認め、合格と判定する。